

Félvezető eszközök multi-domain karakterizációja

Akadémiai doktori értekezés téziséi

Poppe András
Budapest, 2017. szeptember

Bevezetés: tágabb kontextus, motiváció, módszerek

A világ félvezető iparában mind a klasszikus mikroelektronika, mind a szilárdtest fényforrások (LED-ek) gyártása terén évtizedek óta töretlen fejlődés volt tapasztalható. A klasszikus piaci fejlődési törvényt Gordon Moore fogalmazta meg, amely a digitális integrált áramkörök (különösen a mikroprocesszorok) terén megfigyelhető trendeket írja le [1], [2]. A folyamatos méretcsökkenés gazdasági következménye az, hogy az egy tranzisztorra eső gyártási költség is folyamatosan csökken. Az egy integrált áramkörtől lapkán megvalósított alkatrészek számának növekedése azt jelenti, hogy az áramkörök funkcionalitása, általános értelemben vett teljesítőképessége folyamatosan növekszik.

A szilárdtest fényforrások (világítódiodák, LED-ek) fejlődésére vonatkozó hasonló piaci törvényszerűség megállapítása Roland Haitz nevéhez fűződik. A róla elnevezett Haitz-törvény [3], [4] azt fogalmazza meg, hogy az egyetlen egy LED tokból kinyerhető egységnyi fényáram költsége folyamatosan csökken, illetve, hogy az egy tokból kinyerhető teljes fényáram folyamatosan nő. Hasonlóságuk miatt a Haitz-törvényt gyakran a LED-ek Moore-törvényeként is emlegetik.

A mikroprocesszorok teljesítőképességének növekedésére egy igen egyszerű mértékszám az áramkörök órajelfrekvenciájának a növekedése volt, ami a processzorok disszipációsűrűségének a növekedésével járt együtt. A CMOS technika alkalmazása során az egyetlen IC lapkára (CPU modulra) vonatkozó átlagos disszipációsűrűség, illetve a lapkáról a környezet felé elvezetendő hőáramsűrűség napjainkra elérte a $\sim 10 \text{ W/cm}^2$ -es szintet, amely a szokásos tokozási és hűtési módszerek alkalmazása mellett a még kezelhető legnagyobb érték. Mivel jelenleg a CMOS technológia leváltása nem lehetséges, megtorpant az órajelfrekvenciának a közelmúltig tapasztalható töretlen növekedése. Ennek alapján kijelenthető, hogy a mikroelektronika klasszikus fejlődésének egyik gátjává váltak a termikus problémák. Minden olyan megoldás, amellyel egy integrált áramkörtől lapka hűtése javítható, a lapka átlagos hőmérséklete és lapkán kialakuló forró pontok miatt jelentkező hőmérsékleti gradiensek nagysága csökkenthető, a forró pontok kialakulása elkerülhető, illetve az áramkör működése a hőmérsékleti hatásokkal szemben immunissá tehető, az érdeklődés középpontjában van és máig fontos kutatási területet jelent. Ez ma különösen igaz a 3D tokozású integrált megoldások esetében.

A szilárdtest fényforrások, különösen a nagy teljesítményű és nagy fényerejű LED-ek hatásfokuk folyamatos növekedése révén most már felveszik a versenyt a hagyományos fényforrásokkal: fényhasznosításuk mára már meghaladta a kompakt fluoreszcens fényforrásokét és vetekszik a legjobb gázkisülő lámpák fényhasznosításával. A fejlődést korlátozó egyik tényező ebben az esetben is a LED-ekkel elérendő, az ilyen, ún. HID (*high intensity discharge*) lámpák nagyságrendjébe eső fényáram keltése esetén jelentkező veszteségi hő kezelése. Ebben az esetben is a nagy hőáramsűrűség okozza a gondot.

Kutató munkámmal olyan eredmények elérésére törekedtem, amelyekkel a félvezető eszközök termikus problémáit vizsgálni és kezelni tudjuk. Olyan szoftver és hardver eszközök megalkotását kezdeményeztem, amelyekkel esély van arra, hogy mind az analóg és digitális IC-k, mind a világítástechnikai célú fénykibocsátó diódák esetében a termikus problémák a tervezés, illetve a prototípus gyártás során felderíthetők, kezelhetők legyenek. Például az áramkör termikus környezetét is helyesen modellezve elektro-termikus, illetve ún. logi-termikus szimuláció segítségével feltárhatók az áramkörön belüli termikus csatolások hatásai, detektálhatók a magasabb működési hőmérséklet miatt fellépő hibák. LED-ek esetében az általam javasolt mérés-technikai eljárással pontosan meghatározhatóak a LED-ek működési jellemzői a hőmérséklet függvényében. Ennek révén a LED-ek üzemi (meleg) fényárama becsülhető és alkalmas szimulációs eljárásokkal és LED modellekkel az elvárt üzemi fényáramot biztosítani képes hűtési megoldások vizsgálhatók, méretezhetők.

Értekezésem címe *Félvezető eszközök multi-domain karakterizációja*, amely alatt azt értem, hogy komplex módon, az eszközműködést meghatározó minden területre kiterjed az IC vagy alkatrész vizsgálata: konzisztens módon jellemezzük egy áramkör elektromos és termikus viselkedését, LED-ek esetében az elektromos, termikus és fénytechnikai tulajdonságokat.

1 Elektro-termikus áramkörszimuláció

Az elektro-termikus szimuláció az egyik eszköz arra, hogy már a tervezés fázisában felmérhessük azt, hogy a termikus hatások miképp befolyásolhatják egy áramkör működését. Ennek elsősorban az analóg integrált áramkörök, vagy analóg integrált áramköri blokkok esetében van különös jelentősége. Klasszikussá vált J. E. Solomon 1974-es részletes esettanulmánya a monolitikus műveleti erősítők tervezéséről [5], amelyben a szerző egy külön szakaszt szentelt a termikus visszacsatolás DC erősítésre gyakorolt hatásának, és amelyben megfogalmazta azon máig is érvényes layout tervezési elveket is, amelyekkel a parazita termikus hatások egy integrált műveleti erősítő tervezése során minimalizálhatóak. Dr. Székely Vladimír és dr. Tarnay Kálmán korábbi publikációt [6], [7] követően ebben a cikkben is megjelenik az a gondolat, hogy a termikus hatásokat elektromos ekvivalenssel helyettesítsük. Ugyan a Solomon által vizsgált erősítők bipoláris tranzistorokkal lettek megvalósítva, de az általa tárgyalt problémák CMOS műveleti erősítők esetére is igazak. Az ilyen blokkok tervezése az analóg IC tervezés jellegzetes feladatai.

Egy analóg IC blokk tervezésének szokásos menete során az áramkörtervező mérnök nemlineáris áramkörszimulációk sorozatával támogatva elkészíti a kérdéses blokk tranzistor szintű kapcsolási rajzát. Ekkor a termikus hatások figyelembevétele csak arra korlátozódik, hogy egy áramkörszimulációs program (tipikusan a SPICE program [8]-[12] valamilyen kereskedelmi változata) segítségével megvizsgálják a kapcsolási rajzával adott áramköri részlet működését különböző környezeti hőmérsékletek mellett. Ezt követően a megtervezett áramköri séma alapján, a target IC technológia tervezési szabályait figyelembe véve, egy layout tervező mérnök elkészíti e blokk részletes layout rajzolatát. A szokásos ellenőrzések egyik fontos eleme a layoutból visszafejtett, parazitahatásokkal kiegészített hálózatileírás vizsgálata áramkörszimulációval, a *post-layout szimuláció*. Kézenfekvő lenne, hogy egy ilyen post-layout szimuláció során az elektromos parazitahatások mellett pl. a Solomon által tárgyalt, a layouttól függő termikus parazitahatásokat [5] is figyelembe vegyük. Ennek kulcs eleme az alkatrészek közötti termikus csatolást, illetve az egyes alkatrészek és a termikus környezet közötti csatolást leíró hatékony modell és annak szisztematikusan, jól algoritmizálható módon történő meghatározása. E területen én a szimultán iteráció módszerével működő elektro-termikus áramkörszimuláció számára dolgoztam ki megoldásokat.

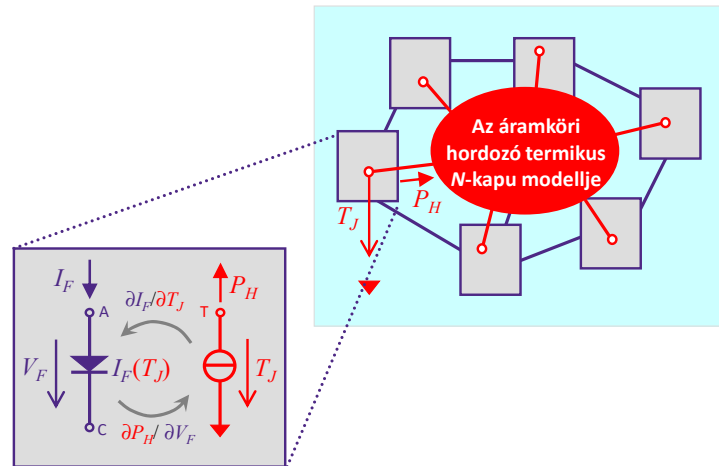
Az elektro-termikus áramkörszimuláció során a vizsgált áramkör elektromos viselkedését nagy pontossággal le tudjuk írni koncentrált paraméteres modellekkel és így az áramkör fizikai megvalósításának a részleteitől eltekinthetünk. Az egész áramkört egy irányított gráffá absztraháljuk, az egyes ágak elektromos jellemzői közötti kapcsolatokat fogalmazzák meg a koncentrált paraméteres modellek. Ezzel szemben, hasonló absztrakció lehetősége az inherens módon elosztott paraméteres rendszerként modellezhető termikus környezetre nem nyilvánvaló. Megoldandó tehát a két különböző absztrakciós szinten adott, különböző típusú egyenletrendszerekkel leírt részek közös rendszerként való szimulációja.

Az egyik lehetőség az, hogy a két alrendszert a saját absztrakciós szintjük kezelésére alkalmas programmal szimuláljuk és e két szimulációs programot alkalmas módon egymáshoz csatoljuk. A másik lehetőség az, hogy valamilyen, lehetőleg pontos és egzakt módszerrel homogénné tesszük a két alrendszer modelljét és a közös elektro-termikus rendszermodellt az adott modellt kezelni képes programmal szimuláljuk. Ezt a módszert *direkt módszernek*, ill. *szimultán iterációnak* nevezik.

Ez az elektro-termikus szimuláció nehezebben implementálható módszere, mert meg kell oldani a termikus rendszer koncentrált paraméteres modellezésének a problémáját. A szimultán iteráció elnevezés arra utal, hogy ekkor egyetlen iterációs ciklust használunk a szimuláció során: a nemlineáris áramkörszimuláció magját képező Newton-Raphson iterációt.

Egy áramkörszimulációs programot elektro-termikus szimulációs programnak nevezünk akkor, ha képes egy áramkör termikus környezetét a megfelelő alkatrészek (hőáramforrás, hőellenállás, hőkapacitás) segítségével az elektromos áramkör koncentrált paraméteres hálózati modelljével közös hálózatileírásban modellezni, és ha a félvezető eszközöknek a programba beépített modelljei alkal-

mas módon ki vannak egészítve a termikus hatások leírásával (saját melegedés, paraméterek hőmérsékletfüggése, termikus kapcsont a környezet termikus modellje felé [6], [7], [13], ahogy azt az 1-1. ábra is illusztrálja), valamint a szimulációs program alkalmas az így kiegészített modellekkel jellemzett félvezető eszközöktől a környezet felé történő hőátadást, illetve az eszközök egymás között fennálló termikus csatolásokat leíró passzív termikus hálózat kezelése. Ez a hálózat egy termikus passzív alkatrészekből (hőellenállásokból és hőkapacitásokból) álló N db kapocsponttal rendelkező hálózat, amelyet egy N -kapunak tekintünk. (N az elektromos hálózat termikus szempontból releváns alkatrészeinek a száma.) Ezen N -kapu kapcsai az elektro-termikus modellekkel jellemzett eszközök termikus kapcsaihoz csatlakoznak, ahogy azt az 1-1. ábra szemlélteti.



1-1. ábra: Egy félvezető eszköz (itt: dióda) elektro-termikus eszközmodelljének és az ilyen eszközök közötti termikus csatolást megvalósító áramköri hordozó lemez (pl. félvezető lapka) termikus hálózati modelljének, illetve ezen modellek kapcsolatának vázlata.

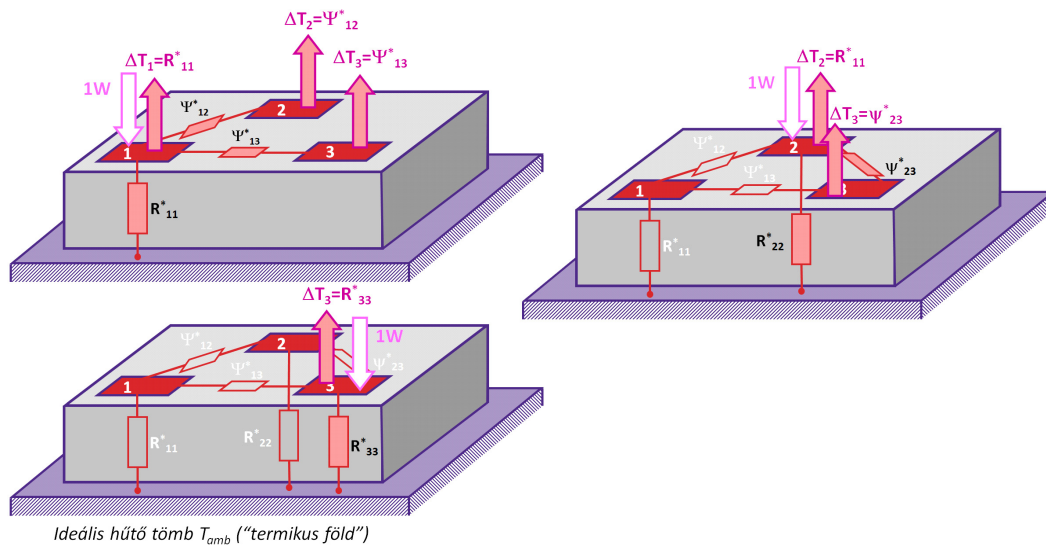
A BME Elektronikus Eszközök Tanszékén 1969-1971 környékén kifejlesztett TRANZ-TRAN program az első egyik elektro-termikus áramkörszimulációs program volt. E programon [6], [7], [13] túl K. Németh [14], illetve K. Fukahori és P. Gray [15] sokat idézett megoldásai is a szimultán iterációval működő áramkörszimulációs programok pionírjai közé tartoznak. A módszernek több, későbbi implementációja is ismert [16]-[20]. Ezekon túl meg kell említeni a TRANZ-TRAN program C nyelvű változataival a mi csoportunk által 1997 és 2012 között megvalósított megoldásokat [J1]-[J3], [C1]-[C6], [C8], [21] is, amelyek többségének kidolgozásában részt vettem. E programváltozatokban az elektro-termikus eszközmodellek sémája szigorúan az 1-1. ábra szerinti: az eszköz termikus környezetét leíró alkatrészek csupán a *junction* csomópontra csatlakozó, külső modellek. Ennek értelmében, ha egy hálózatban N db termikus szempontból releváns alkatrészünk van, akkor ennek a hálózatnak N db termikus ága, ill. N db termikus csomópontja van. Állandósult állapotbeli szimuláció esetére könnyen belátható, hogy létezik egy olyan koncentrált paraméteres termikus hálózat, amely az elektromos áramkör termikus viszonyait helyesen tükrözi. Ez az ekvivalens hálózat egy olyan termikus N -kapu, amelynek minden egyes kapcsa minden más kapcsával egy-egy hőellenállás révén összeköttetésben van, továbbá minden kapcsa és a "termikus föld" között is egy hőellenállás található.

Egy ilyen hálózati modell állandósult állapotra vonatkozó termikus szimulációk sorozatával könnyen előállítható: N db termikusan aktív alkatrész esetében N db szimulációra van szükség. A folyamatot az 1-2. ábra szemlélteti $N=3$ esetre. Az i -edik szimuláció esetében az i -edik alkatrész esetében egységnyi (1 W) disszipációt tételezünk fel, a többi alkatrészt pedig passzívnak tekintjük (disszipációjuk zérus). A szimulációk sorozata által kiszámolt eszközhőmérsékletek (ill. a T_{amb} környezeti hőmérséklethez képesti hőmérsékletnövekmények) egy hőellenállás dimenziójú értékekből álló mátrix elemeit szolgáltatják. Ezt a mátrixot *termikus karakterizációs mátrixnak* nevezzük. Általános esetben, tetszőleges disszipáció mintázatra, a szuperpozíció elve szerint tehát:

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \\ \Delta T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11}^* & \Psi_{12}^* & \cdots & \Psi_{1N}^* \\ \Psi_{21}^* & R_{22}^* & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \Psi_{N1}^* & \cdots & \cdots & R_{NN}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix}. \quad (1)$$

A fenti egyenlet jobboldalán szereplő termikus karakterizációs mátrix elemeiből egyszerű mátrixalgebrai műveletek sorával megállapíthatóak a termikus N -kapu, mint modell hálózat elemértékei.

A fenti eljárással a termikus rendszer koncentrált paraméteres hálózati modellje (azaz az ún. termikus kompakt modellje) az IC lapk laout rajzolata és a lapka fizikai környezetének termikus modellje alapján automatikusan előállítható és az áramkör elektromos modelljével kombinálva előállítható a teljes IC koncentrált paraméteres elektro-termikus hálózati modellje.



1-2. ábra: Egy ideális hűtőtömbre szerelt áramköri hordozón kialakított áramkör állandósult állapotra vonatkozó termikus karakterizációs mátrixa előállításának folyamata ($N=3$).

Az áramkör termikus környezetének hálózati modelljét előállító módszer implicit feltételezése az, hogy a vizsgált áramköri hordozó és annak termikus környezete *reciprok lineáris* rendszer. A reciprocitásnak elvileg teljesülnie kell, de számos gyakorlati szimuláció, illetve több hőforrásos rendszerek mérése során nagyon gyakran nem reciprok viselkedés tapasztalható, azaz a termikus karakterizációs mátrix főátlón kívüli elemeire $\Psi_{ij}^* \neq \Psi_{ji}^*$. Mérések kapcsán ilyen nem reciprok viselkedésről számos publikáció beszámol mind dinamikus, mind állandósult állapotbeli esetben [21], [23], [24], [J6]. Részletes 3D modellek alapján végzett termikus szimulációk esetében is tapasztalható ez a fajta nem reciprok viselkedés [25].

E probléma kezelésére több megoldás is adódik. A legegyszerűbb (és a gyakorlatban többnyire elhanyagolható hibát okozó) megoldás a reciprocitás "kikényszerítése", például a különbözőnek adódott Ψ_{ij}^* és Ψ_{ji}^* értékek átlagának képzése és ezen átlagérték használata a termikus karakterizációs mátrix i,j -edik és j,i -edik elemében. A "nyers erő" ilyen alkalmazása helyett szóba jöhet a nagyon eltérő geometriájú alakzatok több, közel azonos geometriájú részalakzatra bontása, amivel a nem reciprok viselkedés mértéke arra a szintre csökkenthető, ahol a fenti nyers erő módszer alkalmazása már nem okoz számottevő hibát.

A másik lehetőség az, hogy a jelentkező nem reciprok viselkedést valóban modellezzük. Egy, a csomóponti potenciálok módszerét alkalmazó áramkörszimulációs program esetében ez azt jelenti, hogy az előállított vezetési / admittancia mátrix esetében megőrizzük az i,j -edik és a j,i -edik mátrix elemek egyenlőtlenségét. A gyakorlatban ez a megközelítés csak akkor működik, ha a termikus

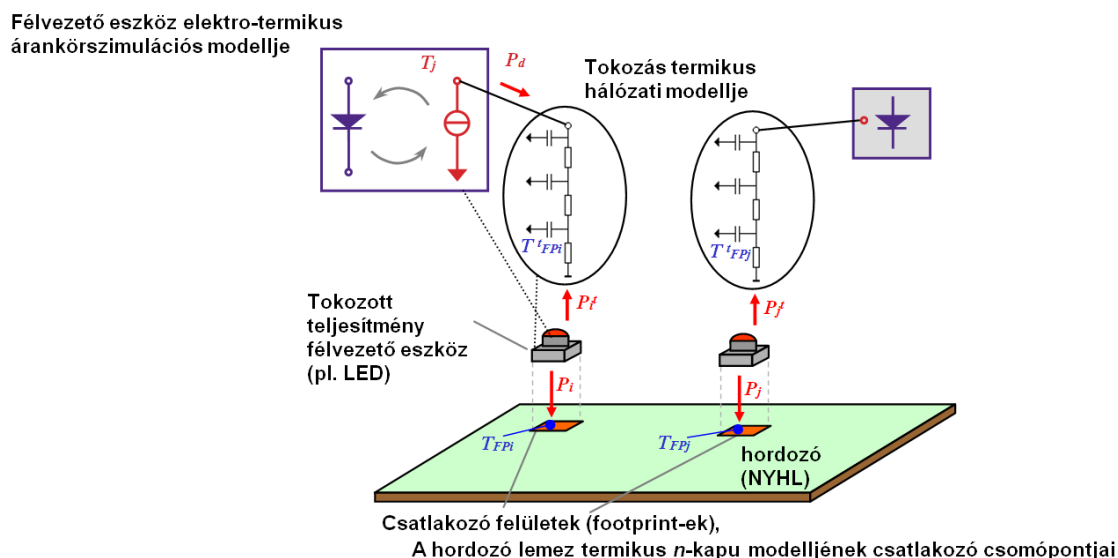
karakterizációs mátrixot maga az elektro-termikus áramkörszimulációs program dolgozza fel és az ennek során előállított transzkonduktanciákat közvetlenül beírja a teljes hálózat vezetési vagy admittancia mátrixának megfelelő mezőibe. Sokszor azonban az elektro-termikus áramkörszimulációs program és az áramkör termikus környezetének karakterizációját végző termikus szimulációs és modellgeneráló programok egymástól függetlenek; a termikus karakterizáció végeredménye a termikus N -kapu hálózatlistája. Ebben az esetben a hálózati modellbe a nem-reciprok viselkedést biztosítandó, egységnyi meredekségű hőmérsékletvezérelt hőáram generátorokat kell beépítenünk [J6].

Megjegyzendő, hogy a csak hőmérsékletérzékeny elemek esetében elegendő a köztük és az egyéb alkatrészek közötti termikus csatolást modellezni, így ezen alkatrészekre vonatkozólag nem szükséges termikus szimulációt végezni. A csak hőmérséklet érzékeny elemre jó példát jelentenek a szilícium-alumínium kontaktusuk, ahol a két különböző anyagi minőségű réteg érintkezése következtében hőmérsékletfüggő kontaktpotenciál alakul ki (Seebeck-hatás), amelynek modellezése egyes áramkörök esetében különösen fontos. Ehhez a Si-Al kontaktusokhatását egy hőmérséklet vezérelt feszültséggenerátorral modellezzük, amelyeknek a hálózatlistába való automatikus beillesztéséhez speciális layout visszafejtő szabályokra van szükség.

A layout alapján történő önkonzisztens elektro-termikus szimuláció egy kiterjesztése az, amikor az áramköri hordozó egy nyomtatott huzalozású lemez, amelyre tokozott félvezető eszközök (pl. teljesítmény LED-ek) vannak szerelve [C7]. Ebben az esetben a szubsztrát termikus N -kapu hálózati modelljének és a tokozott diszkrét félvezetők elektro-termikus eszközmodelljeinek termikus kapcsolai közé be kell iktatnunk a tok dinamikus termikus hálózati modelljét (3. fejezet).

Ezt szemlélteti teljesítmény LED-ek esetére az 1-3. ábra, ami egyben a layout-bázisú elektro-termikus szimuláció egy gyakorlati alkalmazási példáját is szemlélteti: fém magvas nyomtatott huzalozású lemezen, (MCPCB, *metal core printed circuit board*) kialakított LED modul esetében az egyes LED-ek termikus csatolásának hatásának vizsgálatát [C7]. Ehhez a LED-ek valós termikus viszonyait tükröző tok modellre (3. tézis, 3. fejezet) és a LED-ek működését jól leíró multi-domain (elektromos, termikus és optikai) modellre (4. tézis, 4. fejezet) is szükség van.

Az elektro-termikus áramkörszimulációs algoritmusunk működésének a helyességét számos benchmark integrált áramkör megtervezésével, szimulációjával, és a megvalósított áramkörök mérésével igazoltuk [J1], [J2], [J3], [C5], [26].



1-3. ábra: A layout bázisú elektro-termikus szimuláció kiegészítése nyomtatott huzalozású lemezen tokozott diszkrét alkatrészekből kialakított (analóg) áramkörök vizsgálatához: az aktív eszközök termikus kapcsolai és a szubsztrát termikus csatlakozó felületei közé be kell iktatni a félvezető eszközök tokozásának dinamikus termikus hálózati modelljét [C7].

2 Digitális integrált áramkörök logi-termikus szimulációja

Digitális integrált áramkörök működésének termikus vizsgálata már az 1980-as évek elején/közepén felmerült, amikor arra voltak kíváncsiak, hogy az akkor a kereskedelmi forgalomban kapható SSI/MIS IC-k hogy viselkednek pl. a geotermikus kutakban, vagy sugárhajtóművekben tapasztalható magas hőmérsékletű, extrém körülmények közt. Ennek kapcsán a logikai kapuk DC transzfer karakterisztikáinak, másrészt jelkésleltetésük és áramfelvételük hőmérsékletfüggését [27] és megbízhatóságá [28] vizsgálták. Ezen áramkörök esetében a saját melegedés hatása problémaként még nem jelentkezett.

Kutató csoportunk 1996/97-ben javasolta, hogy az analóg integrált áramkörökhöz hasonlóan indokolt lenne a digitális IC-k önkonzisztens elektro-termikus szimulációja. Ennek során az egyes logikai kapuknak az aktivitásukkal arányos disszipációját, az ezen disszipáció miatt bekövetkező lokális hőmérsékletváltozást (saját melegedést) és az ennek következtében a kapuk működési paraméterei (késleltetések, áramfelvétel és ennek révén a disszipáció) hőmérsékletfüggését és ezek egymásra hatását együttesen vizsgáljuk.

Természetesen a digitális áramkörök hőmérsékletfüggő viselkedésének vizsgálata a kilencvenes évek közepén-végén egy elektro-termikus áramkörszimulációs programmal egy néhány logikai kapu alkotta kisebb áramköri részletre tranzisztor szinten gond nélkül elvégezhető volt az előző fejezetben ismertetett (1. tézis szerinti) módon. Látni kell azonban, hogy egy ilyen tranzisztor szinten végzett (az egész IC-t analóg áramkörnek tekintő) elektro-termikus szimuláció számítási igénye akár csak egy néhány száz kapuból álló digitális integrált áramkör esetében is irreálisan nagy (órák, esetleg napok), ami az IC tervezői gyakorlatban megszokott (néhány másodperces, legfeljebb néhány perces) válaszidőkhöz képest elfogadhatatlan.

A termikus hatások egy integrált áramkör minden tranzisztorja esetében jelentkeznek, függetlenül attól, hogy ezek a tranzisztorok egy analóg áramköri blokkban, vagy egy digitális áramkörben működnek. Analóg áramköröknél a hőmérsékletváltozás az áramkör jellemző paramétereinek folytonos változását eredményez(het)i, míg digitális áramkörök esetében, azok nagyobb zajtűrése miatt a hőmérsékletváltozás hatása sokáig rejtve marad; az áramkör lényegi működésében nem vehető észre egészen addig, amíg valamilyen fatális hiba a túlmelegedés miatt be nem következik. E miatt is és a szimulációs válaszidők csökkentésének az igénye miatt is merült fel bennem az a gondolat, hogy a tranzisztor szintű leírásnál magasabb absztrakciós szinten, logikai modelljűkkel adott áramkörök vizsgálatánál is célszerű az áramköri funkciót és a termikus viselkedést együttesen, konzisztens módon vizsgálni, azaz a tranzisztor szintű elektro-termikus szimuláció mintájára célszerű lehet a digitális áramkörök logikai és termikus viselkedését egy ún. *logi-termikus szimulációs rendszerrel* vizsgálni [J2].

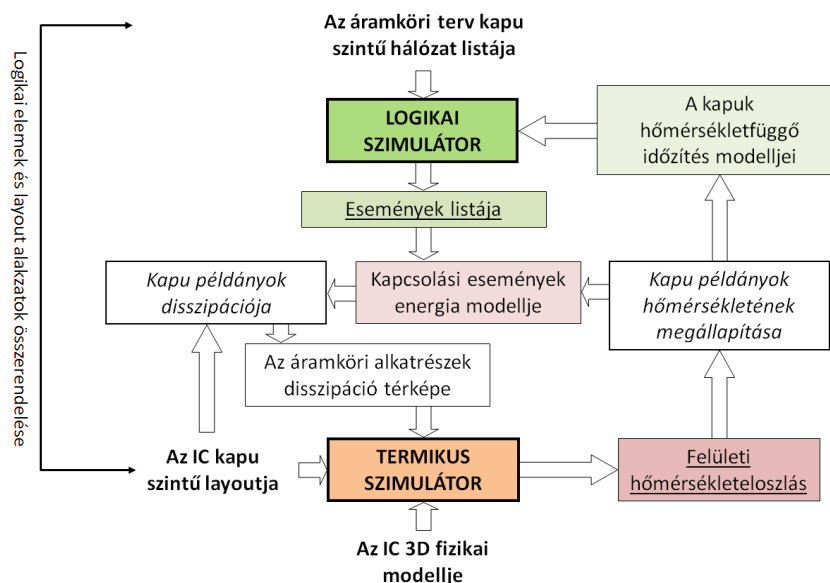
A logi-termikus szimuláció esetében, mivel az elektromos működést bool algebrai egyenletekkel jellemezzük, nincs mód a logi-termikus probléma homogén struktúrájú rendszermodellel való ábrázolására. Ezért egy logi-termikus szimulációs rendszer megvalósítása csak az ún. *szimulátor csatlósos* vagy *relaxációs* módszerrel képzelhető el.

A logi-termikus szimulációt különböző absztrakciós szinten adott hálózatileírás alapján is végezhetünk. A legnyilvánvalóbb a kapu szintű logikai hálózatlistával adott, a végleges áramkör részletes struktúráját tükröző logikai modellel végzett szimuláció [J2], [C5], [C10]-[C12], [J8], [29]-[34]. Lehetséges azonban az is, hogy ennél magasabb absztrakciós szinten adott [C13]-[C16], [J9], [35]-[37], pl. strukturális RTL (regiszter transzfer szintű), illetve viselkedési RTL modellel [C17], vagy még ennél is magasabb absztrakciós szintű modellel (lásd pl.: [C18], [C19], [J10], [J11], illetve [38]) adott hálózatileírás felhasználásával végezzünk szimulációt. Hasonlóképpen, a termikus szimulációt számos, különböző módszert alkalmazó termikus szimulátorral végezhetjük. A kutató csoportunk által implementált logi-termikus szimulációs rendszerekben gyors termikus szimulátorokat (THERMANAL [39] / THERMAN [J4], ill. SUNRED [40]-[42] programok), illetve egy termikus szimulátorral (THERMAN/LayTherm) végzett teljes körű termikus karakterizáció révén előállított

termikus hálózati modelleket használtunk (lásd az előző fejezetet). Például kapu szintű logi-termikus szimuláció során az önkonzisztens eredményekhez úgy jutunk, hogy minden egyes kapu logikai modelljében az időzítési paraméterek hőmérsékletfüggését is leírjuk [J2], [C10], [29], [31], [32], valamint modellezzük a minden egyes állapotváltáshoz (kapcsolási eseményhez) tartozó hődisszipációt és a disszipáció esetleges hőmérsékletfüggését is [J2], [C5], [C10], [C12], [J8], [29], [30], [31].

Kapu szintű önkonzisztens logi-termikus szimuláció során egy adott időintervallumra vonatkozó, individuális kapu hőmérsékleteket feltételező logikai szimulációt végzünk, ahol hőmérsékletfüggő kapukésleltetésekkel és a kapuk elemi eseményeihez tartozó hőmérsékletfüggő disszipáció modell felhasználásával a teljes IC lapka felületére vonatkozó disszipáció sűrűséget számolunk. Az így kapott disszipáció sűrűséggel és az IC fizikai modelljével termikus szimulációt végezve kiszámoljuk az adott eseménysűrűséghez tartozó felületi hőmérsékleteloszlást, amelynek alapján a következő szimulációs időintervallumra frissítjük az egyedi kapu hőmérsékleteket. Ezt a folyamatot szemlélteti a 2-1. ábra.

Fontos, hogy a vizsgált digitális áramkör kapusintű leírása mellett álljon rendelkezésre az áramkör layout rajzolata is, amelyen az egyes logikai kapuknak megfelelő alakzatok beazonosíthatóak. A logikai és a termikus szimulációk eredményeinek együttes kezelése szempontjából ugyancsak fontos, hogy a logikai kapuknak (tárolóknak) megfelelő layout alakzatok és a logikai hálózatlistában szereplő entitások közötti összerendelés (*back annotated netlist*) rendelkezésre álljon [J2], [C10], [C12], [J8].



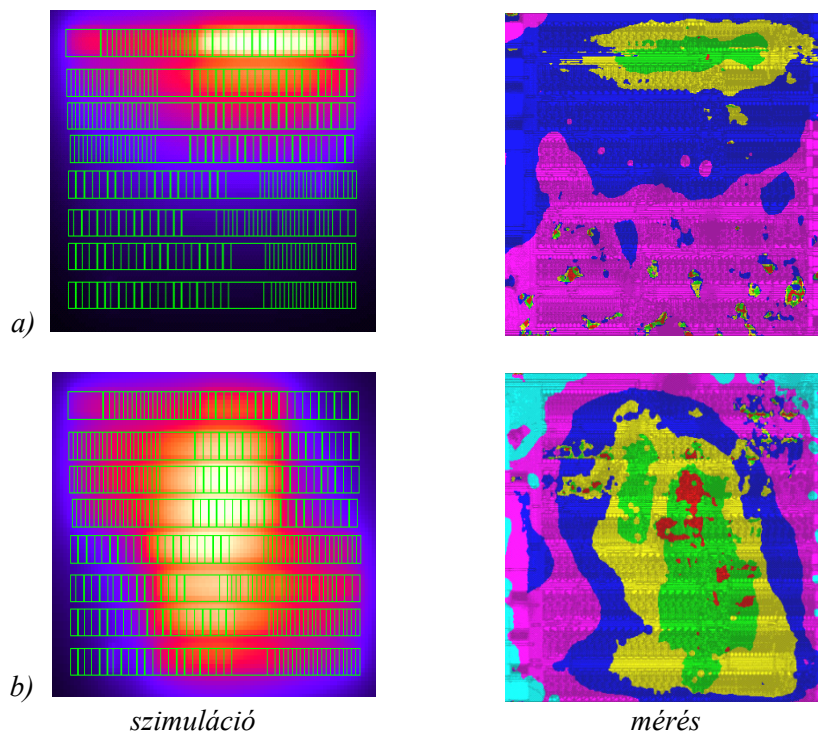
2-1. ábra: Egy önkonzisztens logi-termikus szimulációs rendszer szerkezeti felépítése [C11].

A folyamat lényege, hogy egy hőmérsékletfüggő logikai modellekkel rendelkező és ezekben az individuális kapuhőmérsékleteket felhasználó logikai szimulátor és egy, az egyes kapu példányok disszipációját ismerő termikus szimulátor egymás közt iterálva egymás bemeneteit kölcsönösen frissítik. A folyamatot az áramkör bekapcsolásától indítva és kellő ideig futtatva megkapjuk az áramkör egy jellegzetes üzemmódjának megfelelő stacionárius állapothoz tartozó disszipáció- és hőmérsékleteloszlást és az ezekhez tartozó aktuális időzítési paramétereket. A [J2] és a [C10] publikációkban ismertetett legelső logi-termikus szimulációs rendszer sémája a 2-1. ábra szerinti volt. Ez a legelső, kísérleti megvalósítás standard cellás tervezésű digitális áramkörök vizsgálatára készült, egy, a Cadence Opus IC tervezőrendszerben használt *design kit*-be (Atmel-ES2 ECPD10, 25 MHz-es, 1,0 μm csíkszélességű CMOS technológia) integrálva.

E *design kit* szerinti technológiát használva szimulációs kísérletekkel is és logi-termikus teszt áramkörökön végzett folyadékkristályos mérésekkel is igazoltam, hogy egy logikai áramkör stacionárius állapotának megfelelő felületi hőmérsékleteloszlás jellemző az áramkör működés módjára. Ezt

szemlélteti a 2-2. ábra egy 8 bites számláló példáján keresztül. A hőmérsékletfüggő kapukésleltetések hatásának demonstrálására a legegyszerűbb példa a gyűrűs rezgőkörök (ring oszcillátorok) rezgési frekvenciája hőmérsékletfüggésének vizsgálata. A legelső logi-termikus szimulációs rendszerünk teszteléséhez készített teszt IC segítségével ilyen vizsgálatot is végeztünk [J2].

Az általam javasolt és megvalósított logi-termikus szimulációs alapséma digitális áramkörök stacionárius állapotainak jellemzésére használható. A logi-termikus szimuláció későbbi implementációjában az IC layoutnak megfelelő, tranziens szimulációt lehetővé tevő dinamikus N -kapu modellt használtunk, amelyet az 1. fejezetben bemutatott karakterizációs lépés és az egyes termikus impedanciákat leíró modellhálózatok speciális tulajdonságait kihasználó további poszt-precesszási lépések sorozatával állítunk elő [C12], [C15], [J8], [29]-[34].



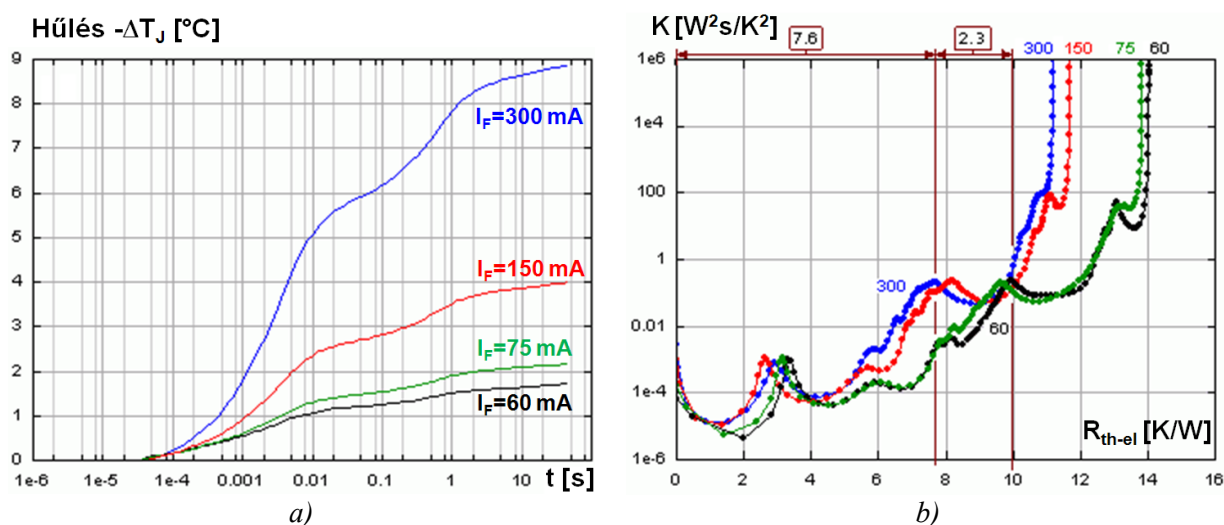
2-2. ábra: A logi-termikus teszt áramkör 8 bites számlálójának szimulált és folyadékkristályos hőtésképező rendszerrel mért hőmérsékleteloszlása 25 MHz-es órajel mellett: a) folyamatos számlálás esetén, b) folyamatos set / pre-set üzemmódban [J2], [C10].

A logi-termikus szimuláció legfrissebb megvalósításainál kétféle megközelítést követtünk. Első megközelítésünk szerint, a korábbi, klasszikus megoldásunk [J2] korrekt, dinamikus termikus modellel ellátott új implementációja készült el (*CellTherm*), amely az [C5] publikációban az analóg elektro-termikus szimuláció számára kifejlesztett termikus modellgeneráló eljárásán túl minden egyéb rendszer komponens tekintetében szabványos EDA szoftver eszközökre és az ilyen szoftver eszközök közötti szabványos interfészekre támaszkodik [C12], [C15], [J8], [29]-[34]. A másik megközelítés szerint a logi-termikus szimuláció saját fejlesztésű dedikált logikai szimulációs maggal történt [C13]-[C16]. E keretrendszerben a termikus szimuláció egy közvetlenül az időtartományban működő gyors termikus szimulációs algoritlussal (SUNRED [40]-[42]) történik [C14], [C16]. Ezen implementáció annyiban haladja meg a *CellTherm* nevű változatot, hogy nem csak kapu szintű leírás használatát támogatja, hanem tetszőleges absztrakciós szinten adott modellek keverékének használatát is megengedi a logi-termikus szimuláció során. Hátránya az egyedi logikai szimulációs kernel használata. A Jani Lázár által kialakított, *LogiTherm* nevű keretrendszer [C17]-[C19], [J10], [J11], e két korábbi logi-termikus szimulációs környezetek számos tulajdonságát ötvözi. A legfontosabb az, hogy a *CellTherm* rendszerben alkalmazott megközelítéshez hasonlóan ez is a lehető legteljesebb mértékben szabványos EDA interfészekre, és egy adott IC tervező-

rendszert egy adott gyártástechnológiára konfiguráló ún. *process design kit*-ben található adatbázisokra támaszkodik. A *LogiTherm* rendszer a korábbi implementációkon messze túlmutat azzal, hogy a hardverleíró nyelvként és logikai szimulációs kernelként a System-C-t [C17], illetve legújabban a System-C AMS-t használja [J11], [C19], aminek a révén analóg funkcionális blokkokat (pl. analóg-digitál átalakítót) tartalmazó, kevert jelű rendszerek szimulációja is lehetővé vált.

3 LED-ek kombinált termikus és optikai mérése, LED tokok termikus modellezése

Közismert, hogy egy LED-es alkalmazás tervezése (tekintettel a LED-ek komplex működésére) összetett feladat, amelynek megoldása során a jó termikus tervezés legalább annyira fontos, mint az elektromos és optikai tervezés. Ezért mind a LED-ek mérésénél, mind a LED tulajdonságok modellezésénél és szimulációjánál erre figyelemmel kell lenni, azaz az IC tervezés kapcsán az előző két tétel kapcsán leírtakhoz hasonlóan, szükség van a teljesítmény LED chip-ek termikus környezetének pontos modelljére és a LED chip-ek megfelelő áramkörszimulációs modelljeire is (4. tétel).



3-1. ábra: Egy 1 W-os vörös teljesítmény LED különböző nagyságú kényszerített nyitóáramú munkapontjához tartozó termikus tranziens mérési eredmények [C21], [C22], [J12]: a) kikapcsolás esetén fellépő hűlési görbék, b) és az azokból számított differenciális struktúra függvények.

A LED tokok termikus karakterizálása esetében az elektronikai ipar 2 évtizeddel korábbi példáját (DELPHI módszertan [43]-[45], ill. JEDEC szabvány [46], [47]) követtük: alkalmas termikus mérések felhasználásával a LED tok termikus határfeltételektől független (*BCI – boundary condition independent*), konecnetrált paraméteres hálózati modelljét, a tok ún. termikus kompakt modelljét igyekeztük előállítani. A kutató csoportunk által a kilencvenes évek közepén-végén kifejlesztett termikus tranziens mérések tették lehetővé azt, hogy a kompakt modellek elkészítéséhez használt részletes fizikai modelleket mérésekkel ellenőrizni, "finomhangolni" lehessen [48], [B1], ami mára szintén bevett ipari gyakorlattá vált [49].

Az első kereskedelmi forgalomban megjelent teljesítmény LED-ek termikus tranziens mérései során tapasztaltuk azt a meglepő jelenséget, hogy a mérés során megállapított termikus impedancia függvényből számított struktúra függvények (ill. differenciális struktúra függvények) alakja függött a vizsgált LED elektromos munkapontjától (3-1. ábra) [C21]-[C23], [J12]. Mivel a struktúra függvény kizárólag a pn-átmenettől a környezetig terjedő hővezetési út fizikai tulajdonságaira jellemző, az általunk tapasztalt elektromos munkapont függésre (nyitóáram- és hőmérsékletfüggésre) magyarázatot kellett találnunk, hiszen elvileg a tok mechanikai szerkezetét jellemző struktúra függvények alakja nem függhet az eszköz elektromos munkapontjától.

A legkézenfekvőbb magyarázat az volt, hogy a mérési adatok kiértékelése során a termikus impedancia JEDEC JESD51-1-es szabványnak [50] megfelelő számítása során a disszipációt pusztán a $P_{el} = I_F \cdot V_F$ betáplált elektromos teljesítmény formájában vettük figyelembe. A fenti mérés technikai

szabvány a P_H -val jelölt tényleges *fűtőtéljesítménnyel* való osztást írja elő, ezért a teljesítmény LED-ek esetében figyelembe kell vennünk az $\eta_e = P_{opt} / P_{el}$ energiakonverziós hatásfokot ahhoz, hogy korrekt módon számoljuk a valós viszonyokat reprezentáló termikus impedanciát:

$$Z_{th_real}(t) = \frac{\Delta T_J(t)}{P_H} = \frac{\Delta T_J(t)}{P_{el} \cdot (1 - \eta_e)} = \frac{\Delta T_J(t)}{I_F \cdot V_F - P_{opt}}. \quad (2)$$

Tekintve, hogy egy LED energiakonverziós hatásfoka függ a LED munkaponti áramától és a pn-átmenet hőmérsékletétől, magyarázatot kaptunk arra, hogy ha a tényleges fűtőtéljesítmény helyett a betáplált elektromos teljesítményre normáljuk a pn-átmenet hőmérsékletváltozását, akkor az így kapott $Z_{th_el}(t)$ függvényből számított struktúra függvények miért változnak a munkapont függvényében:

$$Z_{th_el}(t) = \frac{\Delta T_J(t)}{P_{el}} = \frac{\Delta T_J(t)}{P_H} \cdot (1 - \eta_e), \quad (3)$$

azaz

$$Z_{th_el}(t) = Z_{th_real}(t) \cdot [1 - \eta_e(I_F, T_J)]. \quad (4)$$

Fontos tehát, hogy a teljesítmény LED-ek termikus mérései során ismert legyen a LED-ek energiakonverziós hatásfoka. Ezzel kapcsolatban több probléma is felmerül. Az egyik legfontosabb, hogy a LED gyártók fotometriai laboratóriumai általában nem mérik és nem is közlik a LED-ek kibocsátott P_{opt} optikai teljesítményét. Ha mérik is, az eddigi gyakorlat szerint (ami megfelel a LED-ek optikai mérésére vonatkozó, 2017. augusztusáig létező egyetlen, CIE 127:2007 jelű ajánlásnak [51]) nem előírás a LED-ek kontrollált termikus környezetben való mérése, pusztán csak annak a követelménynek kell eleget tenni, hogy az optikai méréseket a LED-ek termikusan stabil állapotában kell végezni. Innen származik az a gondolat, hogy teljesítmény LED-ek termikus és optikai tulajdonságainak konzisztens mérése csak egyetlen kombinált, termikus és radiometriai/fotometriai összeállításban lehetséges, ahogy azt a témával foglalkozó korai cikkeinkben [C21]-[C23], [J12] javasoltam. Az általam javasolt elvi mérési összeállítást és a mérés folyamatát a 3-2. ábra mutatja be.

A 3-2. ábra szerinti mérési összeállításhoz tartozó mérésvezérlő programmal LED-ek elektromos, optikai és termikus tulajdonságai egyszerre, konzisztens módon mérhetők. Így nagyszámú mérés végezhető automatizáltan, előre programozott hőmérsékleten és nyitóáram mellett. Az ilyen automatizált méréseket a CIE 127:2007 dokumentum [51] szerinti szokásos (szigorú) helyettesítéses mérési eljárás kismértékű, gyakorlati módosítása teszi lehetővé.

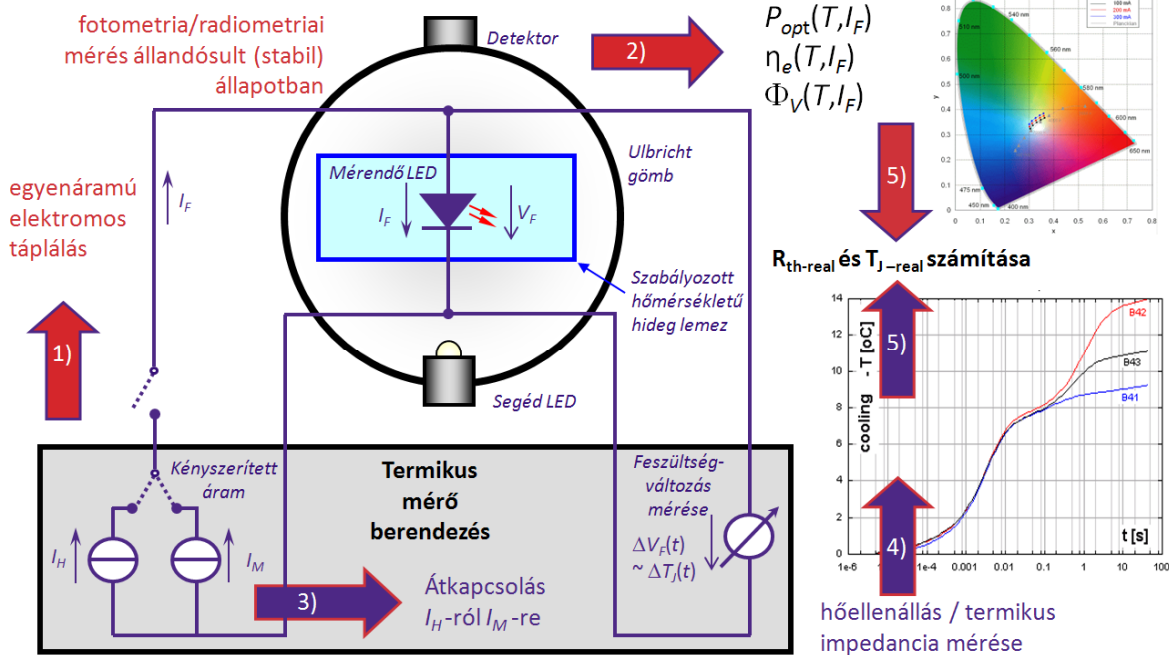
Tekintettel a termikus környezetnek a LED-ek optikai mérésére gyakorolt hatására, fontos a mért LED pn-átmenet hőmérsékletének az ismerete. A kombinált mérés révén rendelkezésre áll az adott összeállításban mért LED valós R_{th_real} hőellenállása és ismert a LED tényleges P_H fűtő teljesítménye. Mivel a mérés egy ismert T_{ref} hőmérsékletű hideg lemezen történik, a fentiek alapján kiszámítható a mért LED pn-átmenetének valós hőmérséklete:

$$T_J = R_{th_real} \cdot P_H + T_{ref}. \quad (5)$$

Ez lehetővé teszi, hogy különböző laboratóriumok azonos nyitóáram és azonos pn-átmenet hőmérséklet mellett végezzenek LED méréseket úgy, hogy a mérések reprodukálhatóak és egymással összehasonlíthatóak legyenek. A LED mérési eredmények (5) képlet szerint kapott T_J pn-átmenet hőmérséklet függvényében való mérés/értelmezése nem csak a mérési eredmények közvetlen összehasonlíthatósága és a mérések ismételhetőségének a szempontjából fontos, hanem a multi-domain LED modellezés számára (4. fejezet) is ezek a releváns bemeneti adatok.

Ahogy e szakasz elején utaltam rá, felmerült a LED tokok termikus kompakt modellezésének az igénye. Ezen igény könnyen kielégíthetőnek tűnt a dekonvolúción alapuló áramkör identifikáció módszerével (a NID módszerrel) [52]-[55], illetve az ezt a módszert használó THERMODEL program [56], [J5] segítségével, ahogy azt integrált áramkörök 3D fizikai struktúrájának termikus tulajdonságait reprezentáló N -kapu modell esetében tettük (lásd az 1. fejezetet).

JESD 51-52: LED hideg lemezen + CIE 127-2007 dokumentum szerinti fluxus mérés



JESD 51-51: termikus mérés JESD51-1 szerinti statikus mérési módszerrel, hideg lemezzel, mint termikus környezettel

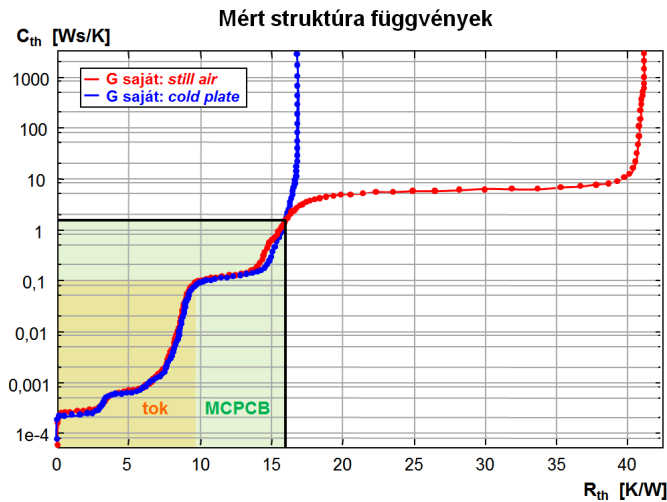
3-2. ábra: Az általam javasolt kombinált termikus és radiometriai/fotometria LED mérési összeállítás és a mérési folyamat vázlata [C27], [C29], [C32], [B1], [B3],. A mérési szekvenciát ajánlásaim [C29] alapján a JEDEC JESD51-51 és JESD51-52 szabványok [57], [58] pontosan rögzítik.

Sajnos azonban a NID módszerrel előállítható modell csak egy "egy dimenziós" termikus RC hálózat, tehát általában, ha egy félvezető tok esetében egyszerre több irányban is terjedhet a lapkán diszszipált hő, akkor ez az RC hálózat nem lesz alkalmas a tok általános modellezésére, mivel a NID módszerrel előállított modell nem független a tok különböző felületein lévő határfeltételektől; a modell magában hordozza a tok termikus mérésekor alkalmazott termikus környezet hatását is. Ez szöges ellentétben a már említett DELPHI módszertan filozófiájával, amelynek lényege a termikus határfeltételektől független, ún. BCI (*boundary condition independent*) modellek előállítása és használata.

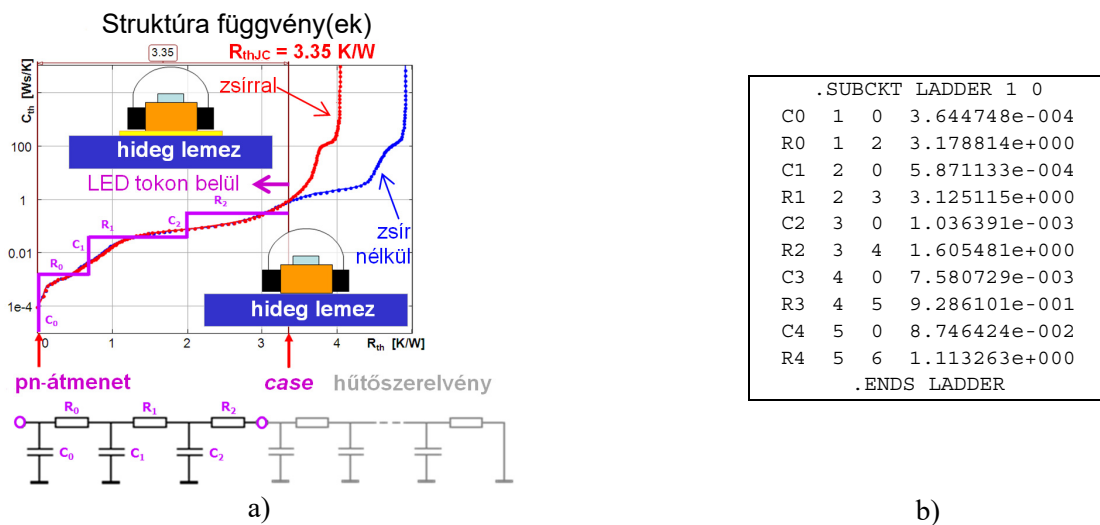
A teljesítmény LED-ek tokozása azonban lényegében egyetlen domináns hővezetési utat realizál. Ez azt jelenti, hogy az ezen hővezetési út mért termikus impedanciájából a NID módszerrel előállított RC hálózati modell mégis BCI modellnek tekinthető. Az ilyen modellek termikus határfeltételektől való függetlenségét kísérletileg igazoltuk is egy RGB LED modul vizsgálatával (3-3. ábra) két extrém módon különböző, gyakorlati termikus határfeltétel mellett: a modult hideg lemezzel szerelve (kék görbe), illetve álló levegős kamrában, szabad felfüggesztés mellett mérve (vörös görbe) [C7]. A 3-3. ábrán látható struktúra függvények elválási pont előtti szakaszai kizárólag a LED modulra jellemzők, az elválási pont utáni szakaszok pedig annak termikus környezetét írják le. Ezzel eljárást is kapunk a NID módszerrel generált kompakt modelleket illető másik probléma kezelésére is, azaz arra, hogy miképp válasszuk szét az így generált Cauer-létrának az alkatrészeire vonatkozó részeit az alkatrész termikus környezetére jellemző részeitől.

A 3-3. ábra szerinti elválási pont létrehozása és a tok (vagy modul) termikus modelljének így módon történő meghatározása mára standard ipari gyakorlat az R_{thJC} -vel jelölt *junction-to-case* hőellenállás meghatározására (JEDEC JESD51-14 szabvány) [59].

Az R_{thJC} hőellenállás mérésére ezt a módszert Farkas Gábor és Oliver Steffens javasolta először [60], majd Dirk Schweitzer finomította tovább munkatársaival [61]-[65] és elnevezték *transient dual thermal interface method*-nak, röviden TDIM-nek.



3-3. ábra: Egy RGB LED modul mért struktúra függvényei [C7].



3-4. ábra: Egy teljesítmény LED tok termikus modelljének a) a JEDEC JESD51-14-es szabvány [59] szerinti végzett termikus tranziens mérések alapján történő megállapítása, b) egy ilyen modell SPICE netlistája.

A módszer lényegét a 3-4. ábra szemlélteti: a tokozott teljesítmény félvezető eszközt (teljesítmény LED-et) hideg lemezre szerelve mérjük először termikus határfelületi anyag (pl. termikus zsír) használata nélkül, majd újból mérjük, termikus határfelületi anyag (termikus zsír) alkalmazásával. Az így meghatározott R_{thJC} junction-to-case hőellenállás egyben megadja a tok modell "case" csomópontját is (3-4a. ábra). Ez a két mérés LED-ek esetében a 3-2. ábra szerinti mérőrendszerben elvégezhető. A a struktúra függvények elválási pontjának megfelelő R_{thJC} hőellenállás érték a mérőrendszer adatkiértékelő szoftverében automatikusan detektálható. Ugyanezen programban implementáltuk a struktúra függvény lépcsős közelítését, amely során megadható az a kumulatív hőellenállás érték (pl. a fenti R_{thJC} érték), ameddig ezt a közelítést kérjük. Így olyan RC létrahálózat készül, amelynek eredő ellenállása a megadott R_{thJC} érték lesz. Az így generált modell SPICE netlista formátumban egy részhálózatként is előáll (3-4b. ábra).

A LED-ek állandósult állapotára vonatkozó termikus jellemzése mellett az iparban felmerült az igény a direkt AC táplálású LED-ek, az ún. AC LED-ek termikus impedanciájának egyetlen mérőszámmal való jellemzésére is. Ennek korrekt megvalósítása nem egyszerű, hiszen egyrészt a komplex impedancia értéke frekvenciafüggő, másrészt az AC LED-ek fűtőteljesítménye egy nagy felharmónikustartalmú periodikus jel. Ezek ismeretében természetesen definiálható egy alkalmas számítási módszer, amivel egy (önkéntesen definiált) valós értékű mérőszám kiszámítható. Ennek lényege, hogy a 3-2. ábra szerinti rendszerrel DC gerjesztés mellett meghatározott időtartománybeli $Z_{th}(t)$ termikus impedancia függvényből meghatározzuk annak $Z_{th}(\omega)$ frekvenciatartománybeli meg-

felelőjét. Ezen felül megmérjük az AC táplásnak megfelelő $P_{el}(t)$ pillanatnyi elektromos teljesítmény hullámformáját, illetve egy gyors fotodetektorral megmérjük az optikai teljesítmény $P_{opt}(t)$ hullámformáját. Ezekből megkapjuk a $P_{dissAC}(t)$ -vel jelölt AC disszipáció hullámformát. Ezzel az AC táplálás során kialakuló stacionárius hőmérséklet, illetve annak hullámformája is számolható:

$$T_{JAC}(t) = \sum_{n=0}^{\pm\infty} Z_{th-n} \cdot P_n \cdot e^{jn\omega_0 t}, \quad (6)$$

ahol $Z_{th-n} = Z_{th}(n \cdot \omega_0)$, ω_0 a $P_{dissAC}(t)$ periodikus disszipáció időfüggvény alapharmonikusának körfrekvenciája, P_n jelöli a $P_{dissAC}(t)$ függvény n -edik harmonikusának Fourier-együtthatóját. Az így kapott $T_{JAC}(t)$ és $P_{dissAC}(t)$ függvények alapján a közvetlen AC táplálású LED-ek ún. effektív AC termikus impedanciája, mint mérőszám definiálható. Többféle ilyen metrika is elképzelhető, pl. a hőmérséklet hullámforma RMS értéke vagy maximális értéke alapján. Ezekre publikációinkban [B1], [C30]-[C33] több javaslatot tettük a következő formában: $Z_{thAC-mean} = T_{JAC-RMS} / P_{dissAC-RMS}$, illetve $Z_{thAC-max} = T_{JAC-max} / P_{dissAC-RMS}$.

4 Teljesítmény LED-ek chip szintű multi-domain modellezése

Amint arra már utaltunk, a LED-ek viselkedését három szoros csatolásban lévő működési tartomány határozza meg: az elektromos, a termikus és az optikai. Gyakorlati szemmel nézve, egy LED *pn-átmenetének a hőmérséklete* befolyásolja az eszköz energiakonverziós hatásfokát, ezen keresztül pedig az kibocsátott *teljes radiometriai fluxusát* (azaz az optikai teljesítményét), illetve a *teljes fényáramát*. Állandósult állapotban a *pn-átmenet hőmérséklete* az eszközben *disszipált teljesítmény* és az eszköz aktív felületétől a környezetig terjedő *hőellenállása* (R_{thJA}) ismeretében kiszámolható. A disszipáció kiszámításához ismerni kell a LED *nyitóáramát* és *nyitófeszültségét*, valamint a *teljes kisugárzott teljesítményét*. E kölcsönös függés számítása iteratív módon lehetséges, pl. egy elektro-termikus áramkör-szimulációs programmal, amely a LED tok 3. tézis szerinti termikus modellje mellett a LED pn-átmenetének viselkedését leíró eszközmodellel is rendelkezik. Célunk tehát egy ilyen, ún. multi-domain LED modell létrehozása volt.

Egy ilyen, ún. Spice-jellegű multi-domain LED modelleknek több gyakorlati alkalmazása lehetséges, pl. LED-ek gyártósori optikai tesztelése során fellépő rövid idejű tranziens folyamatainak a tanulmányozására (lásd pl. a CIE 226:2017-es dokumentumot [66]) és ezzel a gyártósori mérési eredmények és az állandósult állapotbeli (laboratóriumi) mérési eredmények közötti kapcsolat feltárása, vagy pl. egy teljes lámpatest teljes üzemi fényáramának a meghatározása, valamint összetett LED szerelvények (pl. nagy felületű CoB [chip-on-board tokozású több chip-es] LED-ek) termikus szempontokat figyelembe vevő tervezése.

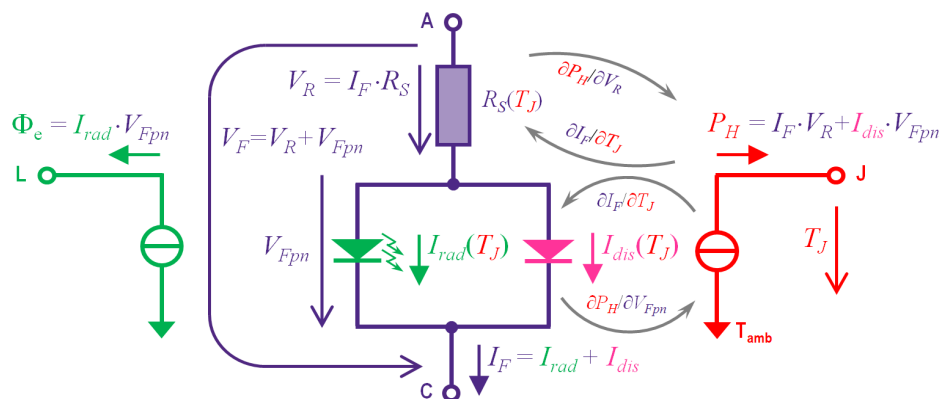
A LED gártók által publikált SPICE szimulációra szánt LED modellek közös problémája, hogy nem elektro-termikus modellek. Ugyancsak probléma, hogy a legtöbb, a gyakorlatban használt SPICE típusú áramkör-szimulációs program alkalmatlan elektro-termikus szimulációra. Végül, de nem utolsósorban a mai standard SPICE jellegű áramkör-szimulációs programok nem teszik lehetővé a LED-ek kisugárzott optikai teljesítményének (és egyéb fénytechnikai paraméterének), illetve pn-átmenet hőmérsékletének számítását. Ezek indokolták azt, hogy más egyetemi kutatókhoz hasonlóan (lásd pl. A. Keppens [67], K. Górecki [68]-[70], C. Negrea et al [71] munkáját) én is foglalkoztam a LED-ek Spice-jellegű multi-domain szimulációját lehetővé tevő modell (ki)fejlesztésével.

Gyakorlati szempontból csak a LED-ek nagyáramú karakterisztika szakaszon tapasztalható viselkedése releváns, ahol a Shockley-modell szerinti exponenciális karakterisztika és a soros ellenállás együttes hatása jelentkezik.

Az első multi-domain LED modellünket több mint egy évtizede publikáltuk [C21], [J12]. Ez a modell is pl. Górecki munkájához hasonlóan a makromodellek közé sorolható, hiszen a TRANZ-TRAN program elektro-termikus változatának beépített alkatrész-készletére támaszkodva egy alkalmas részáramkörrel jellemezte a vizsgált LED-et. Ha egy, a 3.3. altlzis szerinti LED tok modell,

illetve a teljes termikus környezetét leíró modell ([C9], [J7]) mellett a LED chip fizikai működését leíró áramkör-szimulációs modell is a rendelkezésünkre áll, akkor egy elektro-termikus szimulációs képességekkel rendelkező áramkör-szimulációs programmal végrehajtható egy LED-es alkalmazás (pl. egy teljes LED-es közvilágítási lámpatest) multi-domain szimulációja. Célunk tehát egy ilyen chip szintű LED modell megalkotása volt, amely, amennyire lehetséges, a lehető legjobban tükrözzé a működés eszközfizikai alapjait, de használatához ne kelljen részletes információval rendelkezni a LED chip tényleges anyagáról, részletes konstrukciójáról. Fényporos fehér LED-ek esetében a modell használatához ne kelljen az alkalmazott fénypor tulajdonságaival sem tisztában lenni. Fehér LED-ek esetében további feltételezésünk még az, hogy a fénypor réteg ideálisan jó termikus kontaktusban van az alatta elhelyezkedő kék LED chippel, azaz a LED lapka és a fénypor hőmérsékletét azonosnak tekintjük.

További cél volt, hogy az áramkör-szimulációs programban való implementálásra szánt modell fényemisszióra vonatkozó adata (kisugárzott optikai teljesítmény) alapján további kiegészítő modellek segítségével a kibocsátott fény egyéb paraméterei (pl. fényporos fehér LED-ek esetében a teljes fényáram [C39], [J19], míg színes LED-ek esetében a spektrális teljesítményeloszlás [72], [J19]) egyszerűen számolhatók legyenek. Elektromos szempontból a nyitótartománybeli, nagyáramú (10 mA .. 1500 mA) viselkedés pontos modellezése a gyakorlati feladat.



4-1. ábra: A javasolt multi-domain LED modell belső topológiája, a főbb ágjellemzőkkel, beleértve az elektro-termikus és termo-elektromos transzkonduktanciákat is (szürke nyilak, irányuk utal a vezérlő és vezérelt ágakra). Kékkel az elektromos, pirossal a termikus, zölddel az optikai ágakat/mennyiségeket jelezzük az ábrán.

A modell implementálhatósága is egy fontos szempont, éppen ezért mind a szükséges *ágegyenleteket*, mind a modell *belső topológiáját* (4-1. ábra) is megadom. Ezekkel egy, a csomóponti potenciálok módszerét alkalmazó áramkör-szimulációs programba a modell könnyen beépíthető, illetve egy ilyen programban makromodellként is megvalósítható. E javasolt modell nagy előnye az, hogy a főbb ágjellemzők azok a fizikai mennyiségek, amelyek egy, a 3-2. ábra szerinti LED mérőállomással mérhetőek is (nyitóáram, hőmérséklet, nyitófeszültség, teljes kisugárzott optikai teljesítmény).

A modell lényege, hogy egy LED I_F nyitóáramát két részre bontjuk aszerint, hogy a kisebbségi töltéshordozók direkt sávátmenettel, sugárzást keltő módon, vagy indirekt sávátmenettel, disszipatív (hőtermelő) módon rekombinálnak-e:

$$I_F = I_{dis}(V_F) + I_{rad}(V_F). \quad (7)$$

A (7) egyenlet szerint egy LED belső pn-átmenetét tekinthetjük úgy, mintha két párhuzamosan kapcsolt dióda lenne. Az egyik olyan, mint egy közönséges egyenirányító dióda; a rajta eső feszültség és a rajta átfolyó áram szorzatával megegyező teljesítmény teljes egészében hővé alakul, a másik diódát pedig egy 100%-os konverziós hatásfokkal rendelkező világító diódának tekinthetjük. Az (7) egyenlet jobb oldalán szereplő áramösszetevők a 3-2. ábrán vázolt mérőrendszer segítségével elemi számítások után meghatározhatóak. A soros ellenállás hatását elhanyagolva tehát:

$$I_{rad} = \frac{\Phi_e}{V_F}, \quad (8)$$

ami alapján:

$$I_{dis} = I_F - \frac{\Phi_e}{V_F}. \quad (9)$$

Mivel a két áramösszetevő közt csak a kisebbségi töltéshordozók rekombinációs mechanizmusa alapján tettünk különbséget, valamint a LED-ek teljes I_F nyitóáramát is jól leírja a Shockley-féle dióda modell [73], nincs okunk feltételezni, hogy az I_{rad} és I_{dis} áramösszetevőkre önállóan ne lenne érvényes az exponenciális feszültségfüggés. E megfontolás alapján a két áramösszetevőt leíró modellegyenletek szintén a Shockley-féle diódaegyenlet szerintiek:

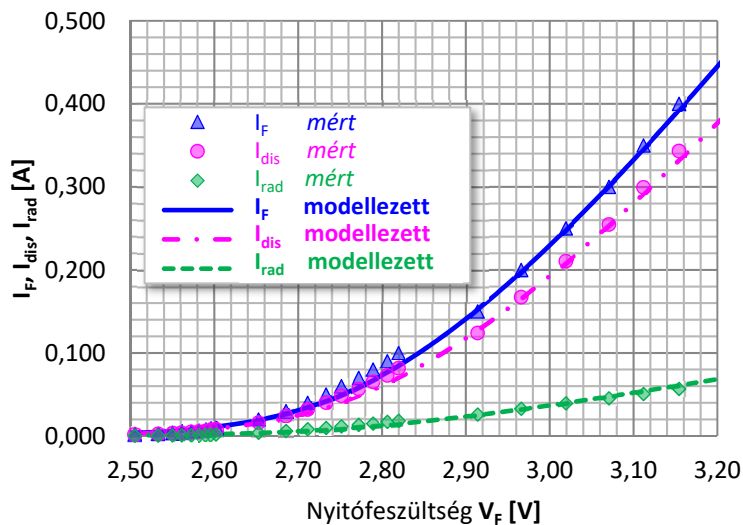
$$I_{rad}(V_{Fpn}) = I_{0rad} \cdot [\exp(V_{Fpn}/(m_{rad}V_T)) - 1] \quad \text{és} \quad (10)$$

$$I_{dis}(V_{Fpn}) = I_{0dis} \cdot [\exp(V_{Fpn}/(m_{dis}V_T)) - 1], \quad (11)$$

ahol V_T ún. *termikus feszültség*, m_{rad} és m_{dis} pedig az egyes áramösszetevőkre vonatkozó idealitási faktorok.

Kiinduló feltevéseinket igazolják a mérési eredmények (lásd a 4-2. ábrát), még fényporos fehér LED-ek esetében is (ahol a fénypor konverziós vesztesége I_{dis} növekedését és I_{rad} csökkenését eredményezi, a fehér LED-ben is használt kék LED-hez áramösszetevőikhez képest).

A modellegyenletek paramétereit a szokásos modellparaméter identifikációs eljárásokkal határoztam meg. A paramétermeghatározást különböző hőmérsékletekhez tartozó izotermikus karakterisztikák esetében elvégezve meghatároztam a főbb modellparaméterek hőmérsékletfüggését is. Mind a soros ellenállásra, mind az idealitási faktorokra egy egyszerű lineáris hőmérsékletfüggés adódott. Az I_{0rad} és I_{0dis} áramegyütthatók hőmérsékletfüggése hasonló jelleget mutat, mint a teljes nyitóáramot leíró diódaegyenlet I_{F0} áramegyütthatója, amely az irodalomból jól ismert.



4-2. ábra: Egy meleg fehér LED mért és modellezett izotermikus $I_F(V_F)$, $I_{dis}(V_F)$, and $I_{rad}(V_F)$ karakterisztikái $T_j = 85^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleten.

Ezt a LED modellt felhasználva, az ELDO program elektro-termikus változatával [20] egy teljes LED-es lámpatest szimulációját elvégeztük [C9], [J7], [C41], [C42], [J20], [J21], [C44]. Ehhez a lámpatest termikus N -kapu modeljét az 1. szakaszban ismertetett eljárással állapítottuk meg [C9], [J7]. A lámpatest szimulációval számított és mért jellemzői jó egyezést mutattak [J7].

5 Tézisek

1. tézis: Egy analóg áramkör termikus N -kapu modelljének szisztematikus előállítása

Kidolgoztam a tranzisztor szintű integrált áramköri kapcsolások layout alapján történő, állandósult állapotbeli, önkonzisztens elektro-termikus szimulációjának eljárását és javaslatot tettem annak megvalósítására professzionális IC tervező CAD-rendszerben [J1], [J2].

- 1.1. Az eljárás lényege, hogy a kapcsolás termikus környezetét is hálózati modellel vesszük figyelembe. Ezt a **modellt az általam kidolgozott eljárással az áramkör megvalósítását reprezentáló layout rajzolat alapján, automatikusan állítjuk elő**. Ennek érdekében egy gyors termikus szimulátort felhasználva [J4], állandósult állapotbeli termikus szimulációk sorozatával előállítjuk az áramkör fizikai elrendezésére vonatkozó ún. *termikus karakterizációs mátrixot*. E mátrix inverzének elemértékeiből a modellhálózatot alkotó hőellenállások értékei meghatározhatóak [C9], [J7].
 - 1.2. A fenti eljárást kiterjesztettem **dinamikus termikus N -kapu modell** előállítására is, amelynek során a vizsgálandó elektromos hálózat termikus környezetének dinamikus jellemzését frekvenciatartománybeli termikus szimulációk sorozatával végezzük el [J2], [J3]. Az ezen szimulációk eredményeképpen kapott termikus Bode diagramokból az elektromos hálózat elemeit összekötő termikus rendszer koncentrált paraméteres hálózati modellje előállítható. Ez a termikus RC hálózati modell dinamikus termikus N -kapuként áll elő a **NID módszer** (*network identification by deconvolution*) frekvencia-tartománybeli változtatának alkalmazásával [J5].
 - 1.3. **Egy olyan kiegészítő layout visszafejtő szabályt dolgoztam ki, amelynek a segítségével egy elektro-termikus hálózatlistába beilleszthető egy, a fém-félvezető kontaktusoknál fellépő Seebeck-hatást leíró modell** [J1], [J2], [J3]. A fenti szimulációs eljárások helyességét benchmark áramkörökön végzett mérésekkel igazoltam [J1], [J2], [J3].
 - 1.4. **Javaslatot tettem arra, hogy amennyiben szükséges, az áramkörök termikus karakterizációs mátrixában jelentkező aszimmetriák által reprezentált nem-reciprocitást az elektromos hálózat termikus N -kapu modelljébe illesztett egységnyi meredekségű, hőmérséklet vezérelt hőáramforrás párokkal vegyük figyelembe** [J6].
 - 1.5. **Javaslatot tettem az analóg integrált áramköri blokkok layout bázisú elektro-termikus szimulációs módszerének nyomtatott huzalozású lemezen kialakított áramköri modulokra való kiterjesztésére.**
- Az áramköri hordozó termikus N -kapu modelljének előállítási folyamata megegyezik az 1.1, ill. 1.2 altézisek szerinti eljárással. Az így kapott termikus N -kapu kapcsai és a hordozóra beültetett tokozott diszkrét félvezető eszközök elektro-termikus eszközmodelljeinek termikus csomópontjai közé az elektro-termikus hálózatlistában be kell illeszteni a kérdéses tok ún. termikus kompakt modelljét [C7], [C9], [J7].

A fenti elveknek megfelelő elektro-termikus szimulációs programrendszer több generációja megvalósításra került [C1], [C2], [C3], [C4], [C5], [C6], [C8].

2. tézis: Digitális integrált áramkörök logi-termikus szimulációja

Digitális IC-k tervezésére szolgáló tervezőrendszerekben is alkalmazható módszert dolgoztam ki az ilyen áramkörök együttes, önkonzisztens termikus és logikai szimulációjának megvalósítására [J2], [J8].

- 2.1. **Módszert adtam** a tranzisztor szintű leírásukkal adott áramköri blokkok relaxációs módszeren alapuló **önkonzisztens elektro-termikus szimulációjának kiterjesztésére, digitális áramkörök stacionárius állapotának vizsgálatára**. Az eljárás kapu szintű logikai hálózatléírás és standard cellás elhelyezési terv formájában adott digitális áramkörök vizsgálatára alkalmas [J2], [C10], [C5]. Az eljárás lépései:
 - A szimuláció által kezelt entitások egy digitális CMOS IC tervezőrendszer cellakönyvtárában található standard cellák: a különböző logikai kapuk és elemi tároló elemek (kapuk).
 - Ezek működése során a fellépő saját melegedés forrása a kimeneti állapotváltozás következtében fellépő dinamikus disszipáció.
 - A kapuk hőmérsékletfüggő paraméterei a bemeneti jelkombináció változások okozta kimeneti állapotváltozásokhoz rendelt késleltetések, valamint az állapotváltozás következtében fellépő disszipáció.

- Ismerte az áramkör fizikai layoutját, az egyes layout elemek és a logikai leírásban szereplő kapuk közötti megfeleltetést, a teljes IC felületi disszipációeloszlása, valamint az áramköri lapka és környezete termikus modellje alapján az egyes kapuhőmérsékletek állandósult állapotbeli termikus szimulációval meghatározhatóak.
- Az így számított hőmérsékleteloszlás alapján az áramkört alkotó összes kapu egyedi hőmérséklete ismert, így az egyes kaputípusokat jellemző logikai modellek egyes kapukra jellemző egyedi példányainak hőmérsékletfüggő paraméterei újra számolhatók és frissíthetők.
- A fentiek számítások megvalósításához egy, az ilyen módon hőmérsékletfüggő kapu modelleket kezelő logikai szimulátornak és egy gyors termikus szimulátornak a relaxációs módszer szerinti együttműködése szükséges.
- Az így megvalósított, a kapu szintű leírásokkal adott digitális integrált áramkörökre vonatkozó önkonzisztens elektro-termikus szimulációt (utalva az áramköri funkcionalitás leírásának absztrakciós szintjére) **logi-termikus szimulációnak** neveztem el [J2].

2.2. **javaslatot tettem a 2.1. altézis szerinti logi-termikus szimulációs rendszerben alkalmazott kapu modellek hőmérsékletfüggő paramétereinek meghatározására** [J2]. Ennek lényege, hogy az egyes standard cellák (kapuk) layout rajzolatai alapján visszafejtett tranzisztor szintű kapcsoláson tranzien্স elektromos szimulációkat végzünk, különböző környezeti hőmérsékletet beállítva az alkalmazott áramkör-szimulációs program számára. Így az egyes bemeneti kombinációkhoz tartozó tranzien্স szimulációkat különböző hőmérsékleteken elvégezve a kapukésleltetések hőmérsékletfüggése a releváns hőmérséklet tartományra meghatározható.

2.3. A fentiek szerint egy professzionális IC tervező rendszer keretein belül megvalósított logi-termikus szimulációs rendszerben egy dedikált **teszt IC segítségével kimutattam, hogy az áramkörök stacionárius hőmérsékleteloszlása a kialakult eseménysűrűségnek felel meg** [J2], [C9].

2.4. Az 1. tételben megfogalmazott, az áramköri hordozó koncentrált paraméteres termikus N -kapu modelljének előállításához hasonló **módszert javasoltam egy tényleges dinamikus szimulációt lehetővé tevő logi-termikus szimulációs rendszer számára szolgáló dinamikus termikus modell előállítására** [J2].

Ennek tényleges megvalósítására (az időközben megszületett egyéb kutatási eredményeinket is felhasználva) egy évtizeddel később került sor [J8]. Ennek segítségével a kapu szintű logikai szimulációval feltárhatóvá váltak egyes digitális áramkörök (ön)melegedése következtében fellépő időzítés-integritási problémák [J8].

3. tétel: LED-ek kombinált termikus és radiometriai mérése

Felismertem, hogy a nagy teljesítményű és nagy energiakonverziós hatásfokkal rendelkező világító diódák szokásos módszerrel mért hőellenállása (termikus impedanciája) munkapontfüggésének alapvető oka az eszközök energiakonverziós hatásfokának hőmérsékletfüggése. Ezért a teljesítmény LED-ek valós hőellenállása, illetve valós termikus impedanciája csak kombinált termikus és radiometriai/fotometriai méréssel állapítható meg.

3.1. Felismertem, hogy a teljesítmény LED-ek valós hőellenállása / termikus impedanciája úgy állapítható meg helyesen, ha a termikus tranzien্স méréssel egyidejűleg megmérjük a világító dióda teljes kisugárzott fényteliességét is, és azt a hőellenállás ill. termikus impedancia számítása során figyelembe vesszük. Ez az iparban szokásos JEDEC JESD51-1 ún. „statikus” termikus mérési szabvány kiegészítését igényli. **Ezért új eljárást dolgoztam ki a teljesítmény LED-ek valós hőellenállásának mérésére** [J12], [C20], [C21], [C22]. Megállapítottam, hogy a JEDEC JESD51-1 szabvány szerinti ún. „dinamikus” mérési eljárás (dynamic test method) alkalmatlan a teljesítmény LED-ek termikus mérésére még akkor is, ha azt a kisugárzott optikai teljesítmény mérésével kombinálják [C34].

3.2. Ennek alapján **javaslatot fogalmaztam meg egy kombinált termikus és radiometriai (fotometriai) LED mérőállomás kialakítására** és a mérőrendszerrel megvalósítandó mérési eljárásokra [B1], [B2], [J15], [J16], [C27]. Ennek során a fotometriában szokásos ún. **szigorú helyettesítéssel mérés újszerű megvalósítását javasoltam, amely révén a LED-ek optikai tulajdonságai számos munkapontban automatizáltnak mérhetőek**. Ennek kapcsán javaslatot tettem a LED-ek mért hőellenállásának / termikus impedanciájának megkülönböztető elnevezésére aszerint, hogy azt a hagyományos termikus mérési eljárások egyikével, vagy az általam javasolt új mérési eljárással mérték-e. Ez utóbbi esetre javasoltam a valós hőellenállás, ill. valós termikus impedancia (real thermal resistance / impedance) megkülönböztető elnevezés használatát.

3.3. **Eljárást adtam arra, hogy a LED tokok dinamikus termikus kompakt modelljeit a fentiek szerinti valós termikus impedanciából, annak struktúra függvény reprezentációja alapján állapítsuk meg.** Az eljárás során a modell külső, „case” kapcsolóját a JEDEC JESD51-14 szabvány szerinti módszerrel állapítjuk meg, majd a pn-átmenetnek megfelelő csomópont és a „case” csomópont közötti hővezetési út

Cauer-típusú RC létra formájú hálózati modelljét az erre jellemző struktúra függvény szakasz lépcsős közelítésével állítjuk elő [J13], [J17], [C7], [C23], [B1], [B2]. Kísérletileg igazoltam, hogy az így előállított LED tok modell a termikus határfeltételektől független (ún. BCI modell) [C7].

- 3.4. *A 3.1 és 3.2. szerinti javaslatok kiterjesztéseképpen egyetlen valós számmal jellemezhető metrikákra tettem javaslatot a közvetlen AC táplálású teljesítmény LED-ek termikus impedanciájának jellemzésére és ezek megállapítására egy mérési-számítási eljárást definiáltam [J14], [B1], [C30], [C31], [C32], [C33]. A szükséges mérések a 3.2. altézis szerinti mérőrendszer kismértékű kiegészítését igénylik. A javasolt két mérőszám bármelyike alkalmas a közvetlen AC táplálású LED-ek termikus tulajdonságainak tömör jellemzésére.*
- 3.5. *Javaslatot tettem a teljesítmény LED-ek pn-átmenet hőmérsékletének indirekt meghatározására és arra, hogy a 3.2 altézisben említett automatizált LED karakterisztika mérések során úgy vezéreljük a mérőrendszer termosztátjának hőmérsékletét, hogy a mérés során mérendő LED pn-átmenet hőmérséklete konstans maradjon. Ennek révén lehetővé vált a **LED-ek ún. izotermikus karakterisztikáinak automatizált mérése, amely karakterisztikák a LED-ek multi-domain modellezésének az alapját képezik** [J17], [J19], [B2], [C29].*

4. tézis: LED-ek chip-szintű multi-domain modelljének kidolgozása

Kidolgoztam teljesítmény LED-ek olyan multi-domain modelljét, amely egy elektro-termikus áramkör-szimulációs magba építhető, ill. egyes kereskedelmi programokban makromodellként megvalósítható. A modell alkalmas arra, hogy a LED tok és termikus környezete hálózati modelljével kiegészítve, önkonzisztens módon leírja egy adott munkapontban egy tokozott teljesítmény LED elektromos, termikus és fénytani viszonyait, [J12], [J19], [B2], [B4], [B5], [C35], [C36], [C37], [C38]. A modell alkalmas mind színes, mind fényporos fehér LED-ek szimulációjára [J19], [J7].

- 4.1. *A modell legfontosabb tulajdonsága, hogy a LED teljes nyitóáramát két komponens összegeként, a **melegedést** (hődisszipációt) eredményező, nem radiatív rekombinációs folyamatokhoz rendelhető és a **fénykibocsátást eredményező**, radiatív rekombinációs folyamatokhoz köthető **áramösszetevők összegeként számolja** [J19], [C37], [B4].*
- 4.2. *A modell összes paramétere egy, a 3. tézis szerinti kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérőállomással végzett mérés eredményeiből a szokásos eszközmodell paraméteridentifikációs eljárásokkal meghatározható [J19], [B4].*
- 4.3. *Kombinált termikus és (spektró)radiometriai LED mérési eredmények vizsgálatával **feltártam a multi-domain LED modell főbb paramétereinek hőmérsékletfüggését és javaslatot fogalmaztam meg ezek leírására** [J19].*
- 4.4. *A multi-domain LED modell számított eredményeit (kisugárzott optikai teljesítmény, teljes nyitóáram, a nyitóáram radiatív összetevője, pn-átmenet hőmérséklete) bemenetként használó kiegészítő modellekkel a LED-ek szokásos főbb fénytechnikai jellemzői egyszerűen számolhatók. Főbb jellemzők: fehér LED-eknél: teljes fényáram [C37], [J19]; színes LED-eknél: spektrális teljesítményeloszlás [J19]. A számítás az áramkör-szimulációs modellt kiegészítő áramköri elemmel (fényáram), ill. egy utófeldolgozó lépésben (spektrális teljesítményeloszlás) történik. **Javaslatokat fogalmaztam meg ezen kiegészítő modellek kialakítására** [C37], [J19].*
- 4.5. *A modell egy önkonzisztens elektro-termikus áramkör-szimulációs rendszerbe beépítve [C37] **alkalmas összetett LED modulok komplex vizsgálatára** [C9], [J7]. Ezt egy LED-es közvilágítási lámpatest multi-domain szimulációjával igazoltam [C9], [J7], [C39], [C40], [C42]. **A modell pontosságát közvetett módon, a lámpatestház mért és szimulált hőmérsékleteloszlásának összehasonlításával igazoltam** [J7].*
- 4.6. *A jelen tézis szerinti multi-domain LED modell segítségével kidolgozásra került egy hasonló LED-es lámpatest környezeti hőmérséklettől független konstans fényáramot biztosító vezérlésében használt **beágyazott LED modell**. [C41] [J20], [J13]. **A modell egy okos lámpatest mérnöki prototípusában került megvalósításra** [C42], [C43], [C44]; **az ezzel a lámpatesttel klímakamrában végzett optikai mérések** (a teljes kisugárzott optikai teljesítménnyel/fényárammal arányos relatív besugárzás, ill. relatív megvilágítás mérések) **is igazolták a jelen tézis szerinti multi-domain LED modell helyességét** [J20], [J13], [C44].*

6 A tudományos eredmények elismertsége, hasznosítása

Az elektro-termikus és logi-termikus szimulációs algoritmusok (1. és 2. tézis) professzionális implementációjával járult hozzá a BME Elektronikus Eszközök Tanszéke a THERMINATOR nevű FW7-es európai kutatási projekthez, amelynek a koordinátora az ST Microelectronics volt. Így készült el például a TRANZ-TRAN program legutóbbi, elektro-termikus képességekkel rendelkező, SPICE netlista kompatibilis változata [21], valamint a kizárólag szabványos EDA interfészeket használó, a Mentor Graphics IC tervezőrendszerében implementált *CellTherm* program [C12], [J8], [29]-[33]. Az 1.1. altézis szerinti N -kapu modellt előállító eljárást a Mentor Graphics cég a FloTHERM programban [74] egy szkript formájában is megvalósította; így tudtuk egy LED-es lámpatest multi-domain szimulációját a FloTHERM és ELDO programok felhasználásával elvégezni [C9], [J7]. A logi-termikus szimulációs elv jelenteti Jani Lázár doktoranduszom jelenlegi kutató munkájának [C17], [J10], [C18], [J11], [C19] is az alapját.

Kezdeményezésemre egy új műszert és mérő szoftvert fejlesztett ki a BME, a Pannon Egyetem, a MicReD Kft. (ma: Mentor Graphics MicReD) és a Tenzi Kft. alkotta konzorcium a TERALED nevű projektben, amely a 3. fejezetben ismertetett kombinált termikus és radiometria LED mérési eljárást valósítja meg. Az így kifejlesztett és ma *MicReD T3Ster TeraLED* márkanéven a Mentor Graphics által gyártott és forgalmazott berendezés [75], [76] a világ több mint 60 LED fejlesztő és kutató laboratóriumában van használatban; a T3Ster műszerrel együtt a vezető LED gyártók körében nagyon hamar *de facto* ipari szabvánnyá vált. Ez a műszeregyüttes lehetővé teszi a teljesítmény LED-ek teljeskörű, automatizált karakterizálását, az ilyen karakterizáció eredményei alapján a LED-ek és LED modulok korrekt modellezését [J12], [C7], [C23], [C27]. A kombinált mérési és modellezési eljárást megvalósító rendszer 2015-ben a LEDs Magazin *Saphire Awards-a* egyik díjazottja lett [77] az *SSL tools and test* kategóriában.

A LED-ek termikus mérésére vonatkozó eljárást általános mérés technikai szabványjavaslatok formájában is megfogalmaztam [J13], [C24], [C25], [C26], [C27], [C28]. Ezen javaslatok alapján elfogadásra került a JEDEC által 2012-ben publikált, a LED-ek termikus méréseiről szóló JESD51-50, 51-51, 51-52 és 51-53 szabványsorozat, amelyet pl. a [J15]-[J18], [B2], [B3] publikációkban ismertettem angol, német és magyar nyelven. A LED termikus szabványok kidolgozásáért 2013-ban a JEDEC elnöki elismerő oklevelét kaptam. E szabványok használata a LED iparban mára általánosan elfogadottnak tekinthető. A LED-ek pn-átmenet hőmérsékletének indirekt meghatározására, illetve beállítására vonatkozó eljárás a CIE legújabb, a LED-ek optikai mérésére vonatkozó ajánlásainak [78] is a része lett.

A LED-ek multi-domain modellezésével kapcsolatos egyik 2012-es publikációmért [C35] 2013-ban elnyertem a *Harvey Rosten Award for Excellence in Thermal Management and Analysis of Electronics Cooling* díjat [78], [80]. A LED méréssel és multi-domain modellezéssel kapcsolatos munkám [J12], [J19], [B4] jelentette az egyik kiinduló alapot a 2016-2018. között a Philips Lighting vezetésével futó Delphi4LED H2020 ECSEL projekt [81]-[83] számára. A 4. tézis kapcsán felmerült számos kérdés további vizsgálatát nemzetközi partnereinkkel közösen ebben a projektben végezzük [84] és az így végzett munka jelenti egy új CIE műszaki bizottság [85] számára a kiindulási alapot.

Az kidolgozott multi-domain LED modell [J19] és teljes lámpatest modellezési eljárás [J7] felhasználásával került kidolgozásra az a beágyazott LED modell, amellyel a HungaroLux Light Kft. PearLight lámpatest családjának hőmérséklettől független konstans fényáramot biztosító vezérlése működik [C43]. A vezérlés helyességét terepi és laboratóriumi mérésekkel igazoltuk [J21], [C44].

A tézisekhez szorosan kapcsolódó publikációk

Folyóirat cikkek

- [J1] V. Székely, **A. Poppe**, M. Rencz, A. Csentes, A. Páhi, "Electro-thermal simulation: a realization by simultaneous iteration", *MICROEL. J.* 28(3): 247-262. (1997), DOI: 10.1016/S0026-2692(96)00029-8

- [J2] V. Székely, **A. Poppe**, A. Páhi, A. Csendes, G. Hajas, M. Rencz, "Electro-thermal and logi-thermal simulation of VLSI designs", *IEEE TRANSACTIONS ON VERY LARGE SCALE INTEGRATION (VLSI) SYSTEMS* 5(3): 258-269. (1997), DOI: 10.1109/92.609868
- [J3] V. Székely, A. Páhi, **A. Poppe**, M. Rencz, "Electro-Thermal Simulation with the SISSI Package", *ANALOG INTEGRATED CIRCUITS AND SIGNAL PROCESSING* 21(1): 21-31. (1999), DOI: 10.1023/A:1008371625945
- [J4] V. Székely, **A. Poppe**, M. Rencz, M. Rosental, T. Teszéri: "THERMAN: a Thermal Simulation Tool for IC Chips, Microstructures and PW Boards", *MICROEL. RELIAB.* 40(3): 517-524 (2000) DOI:10.1016/S0026-2714(99)00249-8
- [J5] V. Székely, M. Rencz, **A. Poppe**, B. Courtois, "THERMODEL: A Tool for Thermal Model Generation, and Application for MEMS", *ANALOG INTEGRATED CIRCUITS AND SIGNAL PROCESSING* 29(1-2): 49-59. (2001), DOI: 10.1023/A:1011226213197
- [J6] **A. Poppe**, Y. Zhang, J. Wilson, G. Farkas, P. Szabó, J. Parry, M. Rencz, V. Székely, "Thermal Measurement and Modeling of Multi-Die Packages", *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES* 32(2): 484-492 (2009), DOI: 10.1109/TCAPT. 2008.2004578
- [J7] **A. Poppe**, "Simulation of LED Based Luminaires by Using Multi-Domain Compact Models of LEDs and Compact Thermal Models of their Thermal Environment", *MICROEL. RELIAB.* 72(5): 65-74 (2017), DOI: 10.1016/j.microrel.2017.03.039
- [J8] A. Timár, Gy. Bognár, **A. Poppe**, M. Rencz, "Electro-thermal Co-simulation of ICs with Runtime Back-annotation Capability", *INTERNATIONAL JOURNAL OF MICRO-ELECTRONICS AND COMPUTER SCIENCE* 1(3): 287-292, (2010)
- [J9] G. Nagy, P. Horváth, L. Pohl, **A. Poppe**, "Advancing the thermal stability of 3D ICs using logi-thermal simulation", *MICROEL. J.* 46(12A): 1114-1120(2015), DOI: 10.1016/j.mejo.2015.06.025
- [J10] L. Jani, **A. Poppe**, "Multilevel logic and thermal co-simulation", *MICROEL. RELIAB.* 67(12): 46-53. (2016), DOI: 10.1016/j.microrel.2016.08.019
- [J11] L. Jani, **A. Poppe**, "Framework for thermal-aware verification of digital and mixed signal systems", *MICROEL. RELIAB.* (2017): megjelenés alatt, DOI: 10.1016/j.microrel.2017.03.023
- [J12] G. Farkas, Q. van Voorst Vader, **A. Poppe**, Gy. Bognár, "Thermal Investigation of High Power Optical Devices by Transient Testing", *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES* 28(1): 45-50. (2005), DOI: 10.1109/TCAPT.2004.843197
- [J13] **A. Poppe**, "When Designing with Power LEDs, Consider Their Real Thermal Resistance", *LED PROFESSIONAL REVIEW* 2009(16): 40-43. (2009),
- [J14] Temesvölgyi T., Farkas G., **Poppe A.**, "AC LED-ek termikus impedanciájának mérése", *ELEKTROTECHNIKA* 104(7-8):10-14. (2011)
- [J15] **A. Poppe**, "Standards zur thermischen Charakterisierung von LEDs", *ELEKTRONIK JOURNAL* 47(3): 42-45. (2012),
- [J16] **A. Poppe**, "Testing of power LEDs: The latest thermal testing standards from JEDEC", *ELECTRONICS COOLING* 19(9): 20-28. (2013)
- [J17] **A. Poppe**, "Determine LED temperature effects for reliable SSL products", *LEDs MAGAZINE* 11(8):67-69. (2014)
- [J18] **A. Poppe**, "Thermal Transient Testing of LEDs for More Reliable SSL Products", *LED PROFESSIONAL REVIEW* 2014(46): 78-85. (2014),
- [J19] **A. Poppe**, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data", *MICROEL. J.* 46(12 A): 1138-1151. (2015), DOI: 10.1016/j.mejo.2015.09.013
- [J20] Hegedüs J., **Poppe A.**, "Közvilágítási lámpatestek karakterizálása multi-domain LED modellekkel – a LED karakterisztikáktól a lámpatest üzemi fényáramáig", *ELEKTROTECHNIKA* 110(3-4): 13-20. (2017),
- [J21] J. Hegedüs, G. Hantos, **A. Poppe**, "Light output stabilisation of LED based streetlighting luminaires by adaptive current control", *MICROEL. RELIAB.* (2017): megjelenés alatt, DOI: 10.1016/j.microrel.2017.06.060

Könyvrészletként megjelent közlemények

- [B1] G. Farkas, **A. Poppe**, "Thermal testing of LEDs", In: C. J M Lasance, **A. Poppe** (szerk.), *Thermal Management for LED Applications*, 551 p., New York: Springer, 2014. pp. 73-165. DOI: 10.1007/978-1-4614-5091-7_4
- [B2] **A. Poppe**, C. J M Lasance, "Standardization of LED thermal characterization", In: C. J M Lasance, **A. Poppe** (szerk.), *Thermal Management for LED Applications*, 551 p., New York: Springer, 2014. pp. 197-264. DOI: 10.1007/978-1-4614-5091-7_6
- [B3] **Poppe A.**, "Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai", In: Barkóczi G., Bolvári G., Dr Szabó F. (szerk.), *Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013: A fény és élettani hatásai*, 208 p. Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2012. pp. 96-102,
- [B4] **Poppe A.**, Szalai A., Hegedüs J., "LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai", In: Németh Z., Nagy B.s V. (szerk.), *Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015: Fények és tények*, 208 p., Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2015. pp. 112-121,
- [B5] **Poppe A.**, "Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modelljéig: szimulációs modellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára", In: Némethné dr Vidovszky Ágnes, Vass László, Nagy János (szerk.), *Világítástechnikai Évkönyv 2016-2017: LED-jen FÉNY!*, 272 p., Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2017. pp. 94-101.,

Konferencia közlemények

- [C1] V. Székely, **A. Poppe**, M. Rencz, A. Páhi, Sz. Hajder, G. Hajas, "Structural and Algorithmic Questions of a Platform Independent Electro-Thermal Simulator", *In: Proc. of the 4th THERMINIC Workshop*, 27-29 September 1998, Cannes, France, pp. 121-126
- [C2] M. Rencz, V. Székely, A. Páhi, **A. Poppe**, "An alternative method for electro-thermal circuit simulation", *In: Proc. of the Southwest Symposium on Mixed-Signal Design (SSMSD'99)*, 11-13 April 1999, Tucson, USA, pp. 117-122, DOI: 10.1109/SSMSD.1999.768603
- [C3] V. Székely, **A. Poppe**, M. Rencz, "Algorithmic extension of thermal field solvers: time constant analysis", *In: Proc. of the 16th IEEE SEMI-THERM'00 Symp.*, 21-23 March 2000, San Jose, USA, pp. 99-107, DOI: 10.1109/STHERM.2000.837068
- [C4] **A. Poppe**, M. Rencz, V. Székely, G. Mezei, T. Prókai, "Development of a platform independent electro-thermal simulator", *In: Proc. of the 7th THERMINIC Workshop*, 24-27 September 2001, Paris, France, pp. 275-280
- [C5] M. Rencz, V. Székely, **A. Poppe**, K. Torki, B. Courtois, "Electro-thermal simulation for the prediction of chip operation within the package", *In: Proc. of the 19th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 11-13 March 2003, San Jose, USA, pp. 168-175, DOI: 10.1109/STHERM.2003.1194357
- [C6] Gy. Horváth, **A. Poppe**, "The Sissy Electro-Thermal Simulation System - Based on Modern Software Technologies", *In: Proc. of the 11th THERMINIC Workshop*, 27-30 September 2005, Belgirate, Italy, pp. 51-54.
- [C7] **A. Poppe**, G. Farkas, V. Székely, Gy. Horváth, M. Rencz, "Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies", *In: Proc. of the 22nd IEEE SEMI-THERM Symp.*, 14-16 March 2006, Dallas, USA, pp. 191-198, DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625227
- [C8] **A. Poppe**, Gy. Horváth, G. Nagy, M. Rencz, V. Székely, "Electro-thermal and logi-thermal simulators aimed at the temperature-aware design of complex integrated circuits", *In: Proc. of the 24th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 16-20 March 2008, San Jose, USA, pp. 68-76, DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509369
- [C9] **A. Poppe**, J. Hegedűs, A. Szalai, R. Bornoff, J. Dyson, "Creating multi-port thermal network models of LED luminaires for application in system level multi-domain simulation using SPICE-like solvers", *In: Proc. of the 32nd IEEE SEMI-THERM Symp.*, 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 44-49, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2016.7458444
- [C10] G. Hajas, A. Páhi, Sz. Hajder, **A. Poppe**, M. Rencz, V. Székely, "Thermal investigation of large digital integrated circuits", *In: Proc. of the 5th MIXDES Conference*, 18-20 June 1998, Lodz, Poland, pp. 223-227
- [C11] G. Nagy, Gy. Horváth, **A. Poppe**, "Consideration of Thermal Effects in Logic Simulation", *In: Proc. of the 14th THERMINIC Workshop*, 24-26 September 2008, Rome, Italy, pp. 229-234, DOI: 10.1109/THERMINIC.2008.4669914
- [C12] A. Timár, **A. Poppe**, M. Rencz, "A Novel Approach of Logi-thermal Simulation Methodology and Implementation for ASIC Designs", *In: Proc. of the 17th MIXDES Conference*, 24-26 June 2010, Wroclaw, Poland, pp. 351-356
- [C13] G. Nagy, **A. Poppe**, "A Novel Simulation Environment Enabling Multilevel Power Estimation of Digital Systems", *In: Proc. of the 17th THERMINIC Workshop*, 27-29 September, 2011, Paris, France, pp. 149-152
- [C14] G. Nagy, A. Timár, A. Szalai, M. Rencz, **A. Poppe**, "New simulation approaches supporting temperature-aware design of digital ICs", *In: Proc. of the 28th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 18-22 March 2012, San Jose, USA, pp. 313-318. DOI: 10.1109/STHERM.2012.6188866
- [C15] G. Nagy, **A. Poppe**, "Simulation Framework for Multilevel Power Estimation and Timing Analysis of Digital Systems Allowing the Consideration of Thermal Effects", *In: Proc. of the 13th IEEE Latin-American Test Workshop (LATW'12)*, 10-13 April 2012, Quito, Ecuador, pp. 1-5, DOI: 10.1109/LATW.2012.6261250
- [C16] G. Nagy, L. Pohl, A. Timár, **A. Poppe**, "Yield enhancement by logi-thermal simulation based testing", *In: Proc. of the 18th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2012, Budapest, Hungary, pp. 196-199,
- [C17] L. Jani, **A. Poppe**, "Extension of SystemC with Logi-Thermal Simulation Capabilities", *In: Proc. of the 21st THERMINIC Workshop*, 30 September - 2 October 2015, Paris, France, Paper 5_11_id132, DOI: THERMINIC.2015.7389604
- [C18] Lázár Jani, **András Poppe**, "Improved Method for Logi-Thermal Simulation with Temperature Dependent Signal Delay", *In: Proc. of the 22nd THERMINIC Workshop*, 21-23 September, Budapest, Hungary, pp. 302-306, DOI: 10.1109/THERMINIC.2016.7749071
- [C19] L. Jani, **A. Poppe**, "Extending a Multi-Level Logi-Thermal Simulation Framework to a Mixed Signal Thermal Aware Simulation Environment Using SystemC-AMS", *In: Proc. of the 16th ITherm Conf.*, 30 May – 2 June 2017, Orlando, USA, pp. 307-314, DOI: 10.1109/ITHERM.2017.7992486
- [C20] G. Farkas, Q. van Vorst Vader, **A. Poppe**, Gy. Bognár, "Thermal Investigation of High Power Optical Devices by Transient Testing", *In: Proc. of the 9th THERMINIC Workshop*, 24-26 September 2003, Aix-en-Provence, France, pp. 213-218
- [C21] G. Farkas, **A. Poppe**, J. Schanda, K. Muray, "Complex characterization of power LEDs: simultaneous measurement of photometric/radiometric and thermal properties", *In: Proc. of the CIE Symposium on LED Light Sources, CIE x026:2004*, 7-8 June 2004, Tokyo, Japan, pp. 92-95
- [C22] G. Farkas, S. Haque, F. Wall, P S Martin, **A. Poppe**, Quint van Voorst Vader, György Bognár, "Electric and Thermal Transient Effects in High Power Optical Devices", *In: Proc. of the 20th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 9-11 March 2004, San Jose, USA, pp. 168-176, DOI: 10.1109/STHERM.2004.1291320

- [C23] **A. Poppe**, G. Farkas, Gy. Horváth, "Electrical, thermal and optical characterization of power LED assemblies", In: *Proc. of the 12th THERMINIC Workshop*, 27-29 September 2006, Nice, France, pp. 197-202
- [C24] **A. Poppe**, C. J. M. Lasance, "On the standardisation of thermal characterisation of LEDs Part II: Problem definition and potential solutions", In: *Proc. of the 14th THERMINIC Workshop*, 24-26 September 2008, Rome, Italy, pp. 213-219, DOI: 10.1109/THERMINIC.2008.4669911
- [C25] C. J. M. Lasance, **A. Poppe**, "Challenges in LED thermal characterisation", In: *Proc. of the 10th EuroSimE Conf.*, 27-29 April 2009, Delft, The Netherlands, Paper Lasance et al. 11 p., DOI: 10.1109/ESIME.2009.4938508
- [C26] **A. Poppe**, C. J. M. Lasance, "On the Standardization of Thermal Characterization of LEDs", In: *Proc. of the 25th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 15-19 March 2009, San Jose, USA, pp. 151-158, DOI: 10.1109/STHERM.2009.4810757
- [C27] **A. Poppe**, G. Farkas, G. Molnár, B. Katona, T. Temesvölgyi, J-W. He, "Emerging standard for thermal testing of power LEDs and its possible implementation", In: *PROC. OF SPIE 7784: Tenth International Conference on Solid State Lighting*, 1-6 August 2010, San Diego, USA, Paper 778414, DOI: 10.1117/12.864054
- [C28] **A. Poppe**, C. J. M. Lasance, "Hot Topic for LEDs: Standardization Issues of Thermal Characterization", In: *SELECTED PAPERS of the CIE Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting, CIE x034:2010*, 27-29 May 2009, Budapest, Hungary, pp. 119-125.
- [C29] **A. Poppe**, G. Molnár, T. Temesvölgyi, "Temperature dependent thermal resistance in power LED assemblies and a way to cope with it", In: *Proc. of the 26th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 21-25 February 2010, Santa Clara, USA, pp. 283-288, DOI: 10.1109/STHERM.2010.5444276
- [C30] **A. Poppe**, G. Farkas, T. Temesvölgyi, B. Katona, G. Molnár, "Thermal Impedance of AC LED-s", In: *Proc. of the 16th THERMINIC Workshop*, 6-8 October 2010, Barcelona, Spain, pp. 127-132,
- [C31] **A. Poppe**, G. Molnár, G. Farkas, T. Temesvölgyi, G. Marosy, Z. Kovács, "Measuring AC Thermal Impedance of LEDs and Assessment of LM80 Test Results", In: *LED Lighting Technologies - Winning Approaches: LED Professional Symposium (LpS 2011)*, 27-29 September 2011, Bregenz, Austria, pp. 96-107.
- [C32] **A. Poppe**, G. Farkas, T. Temesvölgyi, B. Katona, G. Molnár, Cs. Barna, "Thermal Testing of Retrofit AC LEDs", In: *CIE 27th Session-Proc., CIE 197:2011: (Volume1, Part 1-2)*, 10-15 July 2011, Sun City, South Africa, pp. 962-972.
- [C33] **A. Poppe**, B. Siegal, G. Farkas, "Issues of Thermal Testing of AC LEDs", In: *Proc. of the 27th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 20-24 March 2011, San Jose, USA, pp. 297-304, DOI: 10.1109/STHERM.2011.5767214
- [C34] A. Vass-Várnai, J. Parry, G. Tóth, S. Ress, G. Farkas, **A. Poppe**, M. Rencz, "Comparison of JEDEC Dynamic and Static Test Methods for Thermal Characterization of Power LEDs", In: *Proc. of 14th EPTC Conf.*, 5-7 December 2012, Singapore, pp. 594-597, DOI: 10.1109/EPTC.2012.6507151
- [C35] **A. Poppe**, "A step forward in multi-domain modeling of power LEDs", In: *Proc. of the 28th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 18-22 March 2012, San Jose, USA, pp. 325-330, DOI: 10.1109/STHERM.2012.6188868
- [C36] **A. Poppe**, T. Temesvölgyi, "A General Multi-domain LED Model and its Validation by Means of AC Thermal Impedance", In: *Proc. of the 29th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 17-21 March 2013, San Jose, USA, pp. 137-142, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2013.6526818
- [C37] **A. Poppe**, A. Szalai, "Practical aspects of implementation of a multi-domain LED model", In: *Proc. of the 30th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 9-13 March 2014, San Jose, USA, pp. 153-158, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2014.6892232
- [C38] **A. Poppe**, "Multi-domain characterization of semiconductor devices", In: *Proc. of the the 14th BEC Conf.*, 6-8 October 2014, Tallin, Estonia, pp. 17-20, DOI: 10.1109/BEC.2014.7320545
- [C39] **A. Poppe**, J. Hegedüs, A. Szalai, "Multi-domain modeling of power LEDs based on measured isothermal I-V-L characteristics", In: *Proc. of the 2016 CIE Lighting Quality & Energy Efficiency Conference*, 3-5 March 2016, Melbourne, Australia, CIE x042:2016, pp. 318-327,
- [C40] **A. Poppe**, "From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of LEDs: Towards predictive and efficient modeling and simulation of LEDs at all integration levels along the SSL supply chain", In: *Proc. of the 15th International Symp. on the Science and Technology of Lighting (LS15)*, 22-27 May 2016, Kyoto, Japan, pp 387-392. (invited paper),
- [C41] J. Hegedüs, G. Hantos, **A. Poppe**, "Embedded Multi-domain LED Model for Adaptive Dimming of Streetlighting Luminaires", In: *Proc. of the 22nd THERMINIC Workshop*, 21-23 September 2016, Budapest, Hungary, pp. 208-212, DOI: 10.1109/THERMINIC.2016.7749053
- [C42] J. Hegedüs, **A. Poppe**, "Simulation of luminaires based on chip level multi-domain modeling of power LEDs", In: *Proc. of the VI. IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4*, 13-16 September 2016, Karpacz, Poland, pp. 59-64, DOI: 10.1109/LUMENV.2016.7745517
- [C43] A. Szalai, T. Szabó, P. Horváth, A. Tímár, **A. Poppe**, "SmartSSL: application of IoT/CPS design platforms in LED-based street-lighting luminaires", In: *Proc. of the VI. IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4*, 13-16 September 2016, Karpacz, Poland, pp. 65-70, DOI: 10.1109/LUMENV.2016.7745518
- [C44] J. Hegedüs, P. Horváth, G. Hantos, T. Szabó, A. Szalai, **A. Poppe**, "A New Dimming Control Scheme of LED Based Streetlighting Luminaires Using an Embedded LED Model Implemented on an IoT Platform to Achieve Constant Luminous Flux at Different Ambient Temperatures", In: *Proc. of Lux Europa 2017 Conference*, 18-20 September 2017, Ljubljana, Slovenia, pp. 87-92

Hivatkozások

- [1] G. E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits", *Electronics*, pp. 114–117, April 19, 1965, reprinted in *PROC. OF THE IEEE* 86(1): 82-85 (1998)
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_Law (legutóbbi hozzáférés: 2017.04.02)
- [3] Haitz törvénye, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Haitz's_Law (legutóbbi hozzáférés: 2017.03.05)
- [4] R. Haitz, J. Y. Tsao, "Solid-state lighting: 'The case' 10 years after and future prospects", *Phys. stat. sol. (a)* 208(1): 17-29 (2009)
- [5] J. E. Solomon, "The monolithic op amp: A tutorial study", *IEEE J. OF SOLID-STATE CIRCUITS* 9(6): 314-332 (1974)
- [6] V. Székely, K. Tarnay: "Accurate Algorithm for Temperature Calculation of Devices in Nonlinear-Circuit-Analysis Programs", *ELECTRONICS LETTERS* 8:(19) pp. 470-472. (1972)
- [7] V. Székely: "Accurate Calculation of Device Heat Dynamics: a Special Feature of the TRANZ-TRAN Circuit-Analysis Program", *ELECTRONICS LETTERS* 9:(6) pp. 132-134. (1973)
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/SPICE> (legutóbbi hozzáférés: 2017.04.02)
- [9] L. W. Nagel, D. O. Pederson "SPICE: Simulation program with integrated circuit emphasis", Electronics Research Laboratory, College of Engineering, University of California, 1973.
- [10] L. W. Nagel, "SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits", Technical Report ERL-M520, Electronic Research Laboratory, U.C. Berkeley, Berkeley, CA 94720, May 1975.
- [11] A. Vladimirescu, "SPICE - The Third Decade", In: *Proc. of the 1990 Bipolar Circuits and Technology Meeting*, 17-18 September 1990, Minneapolis, USA, pp. 96-101
- [12] A. Vladimirescu, "The SPICE Book", John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1994 (ISBN:0471609269)
- [13] Székely V., Tarnay K.: "Thermal Coupling Phenomena in ICs: Models for Analysis and Synthesis for Circuits Based on Thermal Coupling", In: *Proc. of the 2nd ESSCIRC Conf.*, 21-24 September 1976, Toulouse, France, pp. 54-55. (1976)
- [14] K. Németh, "On the Analysis of Nonlinear Resistive Networks Considering the Effect of Temperature", *IEEE J. OF SOLID-STATE CIRCUITS* 11(4): 550-552 (1976)
- [15] K. Fukahori, P. R. Gray, "Computer Simulation of Integrated Circuits in the Presence of Electrothermal Interaction", *IEEE J. OF SOLID-STATE CIRCUITS* 11(6): 834-846 (1976)
- [16] M.-N. Sabry et al, "Realistic and Efficient Simulation of Electro-Thermal Effects in VLSI Circuits", *IEEE TR. ON VERY LARGE SCALE INTEGRATION (VLSI) SYSTEMS* 5(3): 283-288 (1997)
- [17] S.-S. Lee, D. J. Allstot, "Electrothermal Simulation of Integrated Circuits", *IEEE J. OF SOLID-STATE CIRCUITS* 28(12): 1283-1293 (1993)
- [18] G. Digele, S. Lindenknecht, E. Kasper, "Fully coupled dynamic electro-thermal simulation", *IEEE TR. ON VERY LARGE SCALE INTEGRATION (VLSI) SYSTEMS* 5(3): 250-257 (1997)
- [19] T. Veijola, L. Costa, M. Valtonen. "An implementation of electro-thermal component models in a general purpose circuit simulation program", In: *Proc. of the 3rd THERMINIC Workshop*, 21-23 September 1997, Cannes, France, pp. 96-100
- [20] Ph. Raynaud, "Single Kernel Electro-Thermal IC Simulator", In: *Proc. of the 19th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2013, Berlin, Germany, pp. 356-358, DOI: 10.1109/THERMINIC.2013.6675231
- [21] A. Szalai, Z. Czirkos, V. Székely, "A quasi-SPICE electro-thermal simulator", In: *Proc. of the 18th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2012, Budapest, Hungary, pp. 190-195
- [22] O. Steffens, P. Szabó, M. Lenz, G. Farkas, "Thermal Transient Characterization Methodology for Single-Chip and Stacked Structures", In: *Proc. of the 21st IEEE SEMI-THERM Symp.*, 15-15 March 2005, San Jose, USA, pp. 313-321
- [23] T. Treurniet, V. Lammens, "Thermal Management in Color Variable Multi-Chip LED Modules", In: *Proc. of the 22nd IEEE SEMI-THERM Symp.*, 14-16 March 2006, Dallas, USA, pp. 173-177
- [24] L. Kim, W. J. Hwang, M. W. Shin, "Thermal resistance analysis of high power LEDs with multi-chip package", In: *Proc. of the 56th ECTC Conf.*, 30 May - 2 June 2006, San Diego, USA, pp. 1077-1081
- [25] D. Schweitzer: "Thermal Transient Characterization of Semiconductor Devices With Multiple Heat Sources – Fundamentals for a New Thermal Standard", In: *Proc. of the 19th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2013, Berlin, Germany, pp. 128-134
- [26] V. Székely, S. Török, "Verification of an electro-thermal simulation algorithm", In: *Proc. of the 9th THERMINIC Workshop*, 24-26 September 2003, Aix-en-Provence, France, pp. 233-238
- [27] J. L. Prince et al, "Performance of Digital Integrated Circuit Technologies at Very High Temperatures", *IEEE TR. ON COMPONENTS, HYBRIDS, AND MANUF. TECHNOLOGY* 3(4): 571-579 (1980)
- [28] F. Shoucair, W. Hwang, P. Jain, "Electrical Characteristics of Large-Scale Integration Silicon MOSFET's at Very High Temperatures, Part III: Modeling and Circuit Behavior", *IEEE TR. ON COMPONENTS, HYBRIDS, AND MANUF. TECHNOLOGY* 7(1): 146-153 (1984)
- [29] A. Timár, M. Rencz, "Studying the Influence of Chip Temperatures on Timing Integrity Using Improved Power Modeling", *J. OF LOW POWER ELECTRONICS* 7(10): 531-540 (2011)

- [30] A. Timár, M. Rencz, "Acquiring real-time heating of cells in standard cell designs", In: *Proc. of the 13th IEEE Latin-American Test Workshop (LATW'12)*, 10-13 April 2012, Quito, Ecuador, pp. 121-125
- [31] A. Timár, M. Rencz, "Real-time heating and power characterization of cells in standard cell designs", *MICRO-EL. J.* 44(11): 977-985 (2013)
- [32] A. Timár, M. Rencz, "Logi-thermal simulation using accurate temperature dependent delay models", In: *Proc. of the 19th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2013, Berlin, Germany, pp. 376-380
- [33] A. Timár, M. Rencz, "Temperature dependent timing in standard cell designs", *MICROEL. J.* 45(5): 521-529 (2014)
- [34] Timár A., "Logi-termikus szimuláció sztenderd tervező rendszerekben", PhD értekezés, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, Budapest, 2013.
- [35] K. Etesam-Yazdani, M. Asheghi, H. F. Hamann, "Investigation of the Impact of Power Granularity on Chip Thermal Modeling Using White Noise Analysis", *IEEE TR. ON COMP. AND PACKAGING TECHN.*, 31(1): 211-215 (2008),
- [36] Keysight, HeatWave Electro-Thermal Analysis Software, <http://www.keysight.com/en/pc-2447833/heatwave-electro-thermal-analysis-software> (legutóbbi hozzáférés: 2017.04.02.)
- [37] M. Ito, N. Hesegawa, R. Egawa, K. Suzuki, T. Nakamura, "An Adaptive-Grain Thermal Simulation Method to Evaluate Effects of Spatio-Temporal Analysis Granularity upon The Thermal Behavior of VLSIs", In: *Proc. of the 11th THERMINIC Workshop*, 27-30 September 2005, Belgirate, Italy, pp. 43-50
- [38] S. S. Kumar, A. Zjajo, R. van Leuken, "Ctherm: An Integrated Framework for Thermal-Functional Co-simulation of Systems-on-Chip", In: *Proc. of the 23rd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*, 4-6 March 2015, Turku, Finland, pp. 674-681
- [39] A. Csendes, V. Székely, M. Rencz: "An efficient thermal simulation tool for ICs, microsystem elements and MCMs: the μ S-THERMANAL", *MICROEL. J.* 29 (4-5): 241-255 (1998),
- [40] Zs. Kohári et al, "Studies on the heat removal features of stacked SOI structures with a dedicated field solver program (SUNRED)", *MICROEL. RELIAB.* 38(12): 1881-1891 (1998)
- [41] L. Pohl, V. Székely, "A more flexible realization of the SUNRED algorithm", In: *Proc. of the 12th THERMINIC Workshop*, 27-29 September 2006, Nice, France, pp. 96-100.
- [42] Pohl L., "Speciális félvezetőeszközök szimulációja szukcesszív hálózatredukciós módszerrel", PhD értekezés, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, Budapest, 2012
- [43] H. I. Rosten et al, "Final report to SEMITHERM XIII on the European-funded project DELPHI-the development of libraries and physical models for an integrated design environment", In: *Proc. of the 13th IEEE SEMI-THERM Symp.*, Austin, USA, 28-30 January 1997, pp. 73-91
- [44] H. I. Rosten, C. J. M. Lasance, J. D. Parry, "The world of thermal characterization according to DELPHI-Part I: Background to DELPHI", *IEEE TR. ON COMP., PACKAGING, AND MANUF. TECHN. PART A* 20(4): 384-391 (1997)
- [45] C. J. M. Lasance, H. I. Rosten, J.D. Parry, "The world of thermal characterization according to DELPHI-Part II: Experimental and numerical methods", *IEEE TR. ON COMP., PACKAGING, AND MANUF. TECHN. PART A* 20(4): 392-398 (1997)
- [46] JEDEC JESD15-1 Standard, "Compact Thermal Model Overview" (2008),
- [47] JEDEC JESD15-4 Standard, "DELPHI Compact Thermal Model Guideline" (2008),
- [48] A. Vass-Várnai, R. Bornoff, S. Ress, Z. Sárkány, S. Hodossy, M. Rencz, "Accurate Thermal Characterization of Power Semiconductor Packages by Thermal Simulation and Measurements", In: *Proc. of the Symp. on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'11)*, 11-13 May 2011, Aix-en-Provence, France, pp. 324-329,
- [49] B. Blackmore, "Automatic calibration of detailed IC package models", In: *Proc. of the 32nd IEEE SEMI-THERM Symp.*, 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 105-112
- [50] JEDEC JESD51-1 Standard "Integrated Circuit Thermal Measurement Method - Electrical Test Method" (1995)
- [51] "Measurement of LEDs", CIE 127:2007 Technical Report (ISBN 978 3 901 906 58 9)
- [52] V. Székely, T. van Bien, "Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method", *SOLID-STATE ELECTRONICS* 31(9): 1363-1368 (1988)
- [53] V. Székely, "On the representation of infinite-length distributed RC one-ports", *IEEE TR. ON CIRCUITS AND SYSTEMS II - ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING* 38(7): 711-719 (1991)
- [54] V. Székely, "Identification of RC Networks by Deconvolution: Chances and Limits", *IEEE TR. ON CIRCUITS AND SYSTEMS I - FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS* 45(3): 244-258 (1998)
- [55] Székely V., "Félvezető eszközök termikus problémái", disszertáció (a műszaki tudomány doktora címért), Budapest, 1988
- [56] V. Székely, "THERMODEL: a tool for compact dynamic thermal model generation", *MICROEL. J.* 29(4-5): 257-267 (1998)
- [57] JEDEC JESD51-51 Standard "Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling" (2012)
- [58] JEDEC JESD51-52 Standard "Guidelines for Combining CIE 127:2007 Total Flux Measurements with Thermal Measurements of LEDs with Exposed Cooling Surface" (2012)

- [59] JEDEC JESD51-14 Standard "Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-To-Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path" (2010)
- [60] P. Szabó et al, "Transient junction-to-case thermal resistance measurement methodology of high accuracy and high repeatability", *IEEE TR. ON COMP. AND PACKAGING TECHN.* 28(4): 630-636 (2005)
- [61] D. Schweitzer, H. Pape, L. Chen, "Transient Measurement of the Junction-to-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits", In: *Proc. of the 24th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 16-20 March 2008, San Jose, USA, pp. 193-199
- [62] D. Schweitzer, "Transient Dual Interface Measurement of the Rth-JC of Power Packages", In: *Proc. of the 14th THERMINIC Workshop*, 24-26 September 2008, Rome, Italy, pp. 14-19
- [63] D. Schweitzer et al, "How to Evaluate Transient Dual Interface Measurements of the Rth-JC of Power Packages", In: *Proc. of the 25th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 15-19 March 2009, San Jose, USA, pp. 172-179
- [64] D. Schweitzer et al, "Transient dual interface measurement - A new JEDEC standard for the measurement of the junction-to-case thermal resistance", In: *Proc. of the 27th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 20-24 March 2011, San Jose, USA, pp. 222-229
- [65] H. Pape et al, "Development of a standard for transient measurement of junction-to-case thermal resistance", In: *Proc. of the 12th EuroSimE Conf.*, 2011, pp. 1/8 - 8/8,
- [66] G. Heidel et al, "High-Speed Testing Methods for LEDs", CIE 226:2017 (Technical Report of the CIE TC2-64 technical committee) ISBN 978-3-902842-69-5, DOI: 10.25039/TR.226.2017
- [67] A. Keppens, "Modeling and evaluation of high-power light-emitting diodes for general lighting", Doctoral thesis, D/2010/7515/9, Katholieke Universiteit Leuven, ISBN: 978-94-6018-256-3, <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/274568/1/PhD+text+AK.pdf> (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.07.)
- [68] K. Górecki, "Electrothermal model of a power LED for SPICE", *INT. J. NUMER. MODEL.* 2012; 25:39-45
- [69] K. Górecki, "The Influence of Mutual Thermal Interactions Between Power LEDs on Their Characteristics", In: *Proc. of the 20th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2013, Berlin, Germany, pp. 188-193
- [70] K. Górecki, "Modelling mutual thermal interactions between power LEDs in SPICE", *MICROEL. RELIAB.* 55(2), 389-395 (2015)
- [71] C. Negrea, P. Svasta, M. Rangu, "Electro-Thermal Modeling of Power LED Using SPICE Circuit Solver", In: *Proc. of the 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2012)*, pp. 329-334
- [72] K. Paisnik, A. Poppe, T. Rang, G. Rang, "Physics related modeling of Power LEDs", In: *Proc. of the 13th BEC Conf.*, 3-5 October 2012, Tallinn, Estonia, pp. 57-60
- [73] E. F. Schubert: Light-emitting diodes (2nd ed.), Cambridge University Press, 2006, ISBN: 0-511-34476-7
- [74] Mentor Graphics FloTHERM classic product webpage: <https://www.mentor.com/products/mechanical/flotherm/flotherm/> (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.13.)
- [75] Mentor Graphics MicReD T3Ster/TeraLED műszaki katalógus http://s3.mentor.com/public_documents/datasheet/products/mechanical/products/t3ster-technical-info.pdf (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.16)
- [76] Mentor Graphics MicReD TeraLED product webpages, <http://www.mentor.com/products/mechanical/micred/teraled/> (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.07.)
- [77] A LEDs Magazine Sapphire Awards 2015. évi díjazottjai: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2015/01/leds-magazine-announces-finalists-for-inaugural-sapphire-awards.html> (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.13.)
- [78] Y. Zong et al, "Optical Measurement of High- Power LEDs", 225:2017 (Technical Report of the CIE TC2-63 committee) ISBN 978-3-902842-12-1, DOI: 10.25039/TR.225.2017
- [79] <http://rostenaward.com/#winning-papers> (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.13.)
- [80] <https://www.mentor.com/company/news/mentor-harvey-rosten-award-2012> (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.13.)
- [81] A Delphi4LED projekt honlapja: www.delphi4LED.eu (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.07.)
- [82] R. Bornoff et al, "Delphi4LED - From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of LEDs: a New European R&D Project for Predictive and Efficient Multi-domain Modeling and Simulation of LEDs at all Integration Levels Along the SSL Supply Chain", In: *Proc. of the 22nd THERMINIC Workshop*, 21-23 September 2016, Budapest, Hungary, pp. 174-189
- [83] G. Martin et al, "Delphi4LED - From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of Light Emitting Diodes (LED)", *ELECTRONICS COOLING* 22(12): 20-23. (2016)
- [84] G.A. Onushkin et al, "Assessment of Isothermal Electro-Optical-Thermal Measurement Procedures for LEDs", In: *Proc. of the 23rd THERMINIC Workshop*, 27-29 September 2017, Amsterdam, The Netherlands, Paper 146
- [85] CIE TC2-84-es műszaki bizottsága: http://div2.cie.co.at/?i_ca_id=561&pubid=505 (legutóbbi hozzáférés: 2017.08.13.)